

**Technische Hochschule Köln**  
Fachbereich Informatik  
Studiengang Wirtschaftsinformatik

## Bachelorarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades des  
Bachelor of Science

# Daten Teleportation mit Hilfe der Quantenphysik – ein Einblick in aktuelle Entwicklungen

Erstprüfer: Prof. Dr. Bertelsmeier  
Zweitprüfer: Prof. Dr. Günther

Autor:  
Patrick Plamper  
Herbertshagenerstr. 27  
51597 Morsbach  
[patrick.plamper@gmail.com](mailto:patrick.plamper@gmail.com)  
11099142

20.02.2017

## Abstract

Aus Science-Fiction Filmen wie „Star Trek“ kennen wir „Beamen“. Dort werden komplette Personen durch Beamen auf z.B. Planeten transportiert. Dies hört sich im ersten Moment sehr nach Science-Fiction an, allerdings ist das Beamen von Informationen seit ein paar Jahren sehr real geworden.

Einleitend wird im Kapitel 2.1 eine Studie von Cisco vorgestellt, die zeigt wie unserer Datenverkehr in den nächsten Jahren ansteigt und worauf sich die Provider einstellen müssen. Anschließend wird im Kapitel 2.2 erklärt, wie die Übertragungsgeschwindigkeit von Daten errechnet wird und wie schnell die herkömmlichen Verfahren sind. Abschließend zum 2. Kapitel, werden die 3 gängigsten Übertragungsverfahren im Kapitel 2.3.1 bis 2.3.3 vorgestellt. Da nun ein Grundverständnis für herkömmliche Datenübertragungen geschaffen wurde, wird im Kapitel 3 die Quantenphysik vorgestellt und die grundlegendsten Begriffe, die nötig sind um die sog. Quantenteleportation zu verstehen. Da diese Arbeit sich besonders an Informatiker richtet, die nicht viel Vorwissen in Bezug auf die Quantenphysik besitzen, wird dies so einfach wie möglich gehalten. Im darauffolgenden Kapitel 4, wird nun die Quantenteleportation vorgestellt. Einleitend dazu wird zuerst im Kapitel 4.1 die Quantenverschränkung erklärt, auf der die Teleportation beruht. Im Kapitel 4.2 wird erklärt, wie solche Verschränkungen entstehen. Da nun ein Grundlegendesverständnis für Verschränkung vorhanden ist, wird im Kapitel 4.3 der Aufbau einer Teleportation vorgestellt. Da diese Wissenschaft sehr neu ist, entstehen so gut wie jedes Jahr mehrerer neue Durchbrüche auf diesem Gebiet. Deswegen wird im Kapitel 4.4 die aktuellen Fortschritte und Ziele der Quantenteleportation beschrieben. Doch was für Vorteile hat diese Quantenteleportation? Diese Frage wird im Kapitel 4.7 geklärt. Diese Quantenteleportation soll später mit sog. Quantencomputern unterstützt werden. Diese werden im Kapitel 5 vorgestellt und ihre Funktionsweise kurz erklärt. Im letzten Kapitel 6 wird nochmals alles zusammengefasst und es wird ein Ausblick gegeben, wie sich diese Technik in den nächsten Jahren entwickelt und wofür sie eingesetzt werden soll ein. Zum Schluss wird ein Fazit gezogen inwieweit diese Technik relevant für uns Informatiker ist.

Diese Bachelorarbeit soll die Frage klären, ob die Teleportation von Daten in näherer Zukunft Alltag wird und die herkömmlichen Kommunikationstechniken ablösen kann.

## Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	2
Inhaltsverzeichnis .....	3
Tabellen- und Abbildungsverzeichnis .....	4
Abkürzungsverzeichnis.....	5
1 Einleitung.....	6
2 Datenübertragung.....	8
2.1 Datenverkehr .....	8
2.2 Übertragungsgeschwindigkeit.....	10
2.3 Herkömmliche Datenübertragungsarten .....	12
2.3.1 Elektrische Signale .....	12
2.3.2 Optische Signale .....	13
2.3.3 Elektromagnetischen Wellen.....	14
3 Quantenphysik .....	17
3.1 Das Doppelspalt-Experiment .....	18
3.2 Quanten .....	21
3.3 Elementarteilchen.....	21
3.3.1 Elektronen.....	23
3.3.2 Photonen .....	23
3.4 Quantenbit .....	24
4 Quantenteleportation.....	25
4.1 Quantenverschränkung.....	26
4.2 Entstehung verschränkter Systeme .....	28
4.3 Teleportation Versuchsaufbau .....	29
4.4 Fortschritte bei der Teleportation.....	32
4.5 Quantenrepeater .....	33
4.6 Quantenkryptografie .....	34
4.7 Vorteile der Quantenteleportation.....	36
5 Quantencomputer.....	37
6 Fazit .....	39
6.1 Zusammenfassung.....	39
6.2 Ausblick .....	41
6.3 Schlusswort .....	43
Literaturverzeichnis .....	44
Eidesstattliche Versicherung.....	48

## Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Datenvolumen Prognose bis 2020 .....	9
Abbildung 2: Quaternäre Übertragung .....	10
Abbildung 3: Binäre Übertragung .....	10
Abbildung 4: Elektrische Signalarten .....	13
Abbildung 5: Optische Signalübertragung .....	14
Abbildung 6: Signalschwingung .....	15
Abbildung 7: Trägerschwingung .....	15
Abbildung 8: Amplitudenmodulation .....	16
Abbildung 9: Frequenzmodulation .....	16
Abbildung 10: Doppelspalt – Teilchen .....	19
Abbildung 11: Doppelspalt – Wellen .....	19
Abbildung 12: Doppelspalt – Quanten (unbeobachtet) .....	20
Abbildung 13: Elementarteilchen im Standardmodell .....	22
Abbildung 14: Quantenverschränkung zweier Elektronen .....	26
Abbildung 15: Polarisationszustände von Photonen .....	27
Abbildung 16: Entstehung verschränkter Systeme .....	29
Abbildung 17: Die vier Bell-Zustände.....	30
Abbildung 18: Teleportation Versuch Aufbau .....	31
Abbildung 19: Quantenrepeater - Entanglement Swapping .....	34
Abbildung 20: BB84-Protokoll.....	36
Abbildung 21: Darstellung des Pauli-Z-Gatters .....	38
Tabelle 1: Übertragungsgeschwindigkeiten im Vergleich.....	11

## Abkürzungsverzeichnis

NIST            National Institute of Standards and Technology

DKE            Deutsche Kommission Elektrotechnik

dB              Dezibel

## 1 Einleitung

Wir leben im Kommunikationszeitalter. Immer mehr Daten werden erfasst und gespeichert. Die Menge an Daten wächst jedes Jahr. Daten werden von Sensoren, die z.B. im Handy oder im Auto verbaut sind, produziert oder aber auch von sozialen Netzwerken, die jeden Klick von uns speichern um personenbezogener Werbungen zuschalten. Alles was über das Internet getan wird, wird irgendwo vermerkt und gespeichert. Seit einigen Jahren gibt es das sog. Cloud-Computing. Dies ist laut des US-amerikanischen Standardisierungsstelle NIST:

*„[...] ein Modell, das es erlaubt bei Bedarf, jederzeit und überall bequem über ein Netz auf einen geteilten Pool von konfigurierbaren Rechnerressourcen (z. B. Netze, Server, Speichersysteme, Anwendungen und Dienste) zuzugreifen, die schnell und mit minimalem Managementaufwand oder geringer Serviceprovider-Interaktion zur Verfügung gestellt werden können.“*

Durch dieses System, werden riesige Mengen an Daten, Tag täglich z.B. vom Cloud Server zum Kunden per Internetleitung transportiert. Streamingdienste für Filme und Musik basieren ebenfalls auf dem Cloud System und benötigen eine gute Datenanbindung. <sup>1</sup>Der Datenbestand soll sich laut Marktbeobachter von IDC und des Speichersystem-Herstellers EMC, jedes Jahr verdoppeln und bis 2020 eine gesamte Menge von 40 Zettabyte (21 Nullen nach der Eins) erreichen. Dies wäre 50mal so viel wie 2010.

Damit dies alles funktioniert, muss die Infrastruktur dahinter stimmen. Da die Daten per Internetleitung transportiert werden müssen, werden die alten Kupferkabel durch die neue Glasfasertechnik ersetzt, da es im <sup>2</sup>Vergleich zum Kupferkabel theoretisch 30 Terabit anstatt von 10 Gigabit pro Sekunde versenden kann. Aber dies wird auch nicht für ewig ausreichen.

Aber was wäre, wenn Daten ohne Begrenzung der Größe und unmittelbar ohne Verzögerungen ankommen? Dies wäre mit einer Teleportation von Daten möglich. Die Teleportation ist seit je her eine Zukunftsversion der Menschheit. Aber dies ist, zumindest

---

<sup>1</sup> Jüngling, T. - Datenvolumen verdoppelt sich alle zwei Jahr

<sup>2</sup> NETHINKS GmbH. - Begriffe aus der Netzwerktechnik: Kupfer oder Glasfaser – welches Kabel hat die Nase vorn?

in kleinen Teilen, nicht mehr reine Sci Fiction. Dank der Quantenphysik ist es einem Forscher Team des NIST gelungen über 100 Kilometer Informationen per Glasfaser zu Teleportieren.

<sup>3</sup>Allerdings hat diese Teleportation nichts mit dem aus Sci Fiction Filmen bekannten „Beamen“ zu tun, sondern es werden Informationen abhörsicher und extrem schnell versendet. In dieser Arbeit, wird auf diese Quantenteleportation eingegangen und diese Technik erklärt. Des Weiteren werden die Technischen Möglichkeiten, die diese Technik bietet aufgezeigt. Darüber hinaus werden aktuelle Techniken, die zur Datenübertragung angewendet werden, vorgestellt.

---

<sup>3</sup> Mundzeck, T. - Forschern gelingt Rekord in Quantenteleportation

## 2 Datenübertragung

<sup>4</sup>Wir sind umgeben von Daten. Überall um uns herum werden Daten generiert. Daten sind in besonderer Form dargestellt z.B. Zeichenketten, die Informationen enthalten und von Systemen verarbeitet werden können.

Durch Big Data entstehen Unmengen an Daten. Dadurch steigen die zu speichernden und zu übertragenden Daten jedes Jahr. Im Kapitel 2.1 (2.1 Datenverkehr) wird dies erklärt. Des Weiteren werden die Probleme, die dabei entstehen, erläutert. Anschließend wird im Kapitel 2.2 (2.2 Übertragungsgeschwindigkeit) erklärt, was eine Übertragungsgeschwindigkeit ist und wie diese zustande kommt. Darüber hinaus werden verschiedene Übertragungsarten mit ihren Übertragungsgeschwindigkeiten gegenübergestellt. Abschließend werden in Kapitel 2.3 (2.3 Herkömmliche Datenübertragungsarten) die bisher herkömmlichsten Datenübertragungsarten vorgestellt und ihre grobe funktionsweise erklärt.

### 2.1 Datenverkehr

<sup>5</sup>Durch die stetig wachsende Anzahl von Daten, steigt auch der Menge an Daten, die transportiert werden müssen. 2014 führt Cisco eine Studie zu diesem Sachverhalt. Alleine in Deutschland, soll demnach der Traffic um das zehnfache ansteigen. Diese Studie wird jedes Jahr aktualisiert. Sie wird von unabhängigen Analysten erstellt und beruht auf Messungen und auf Erhebungen, die von Cisco selber erstellt worden sind, basierend auf ihren eigenen Datenverkehr.

[Link](#) zur Cisco Studie: VNI Global Forecast and Service Adoption.

<sup>6</sup>Über die Hälfte des gesamten Traffics in Deutschland, wird durch Mobilegeräte verursacht. Dies liegt zum einen daran, dass es immer mehr mobile Geräte gibt. Ein Hauptgrund, dass der Traffic in den letzten Jahren so rasant gestiegen ist, sind Video on Demand. Fast 80% des gesamten Datenverkehrs, ist darauf zurückzuführen. 2014 hatte

---

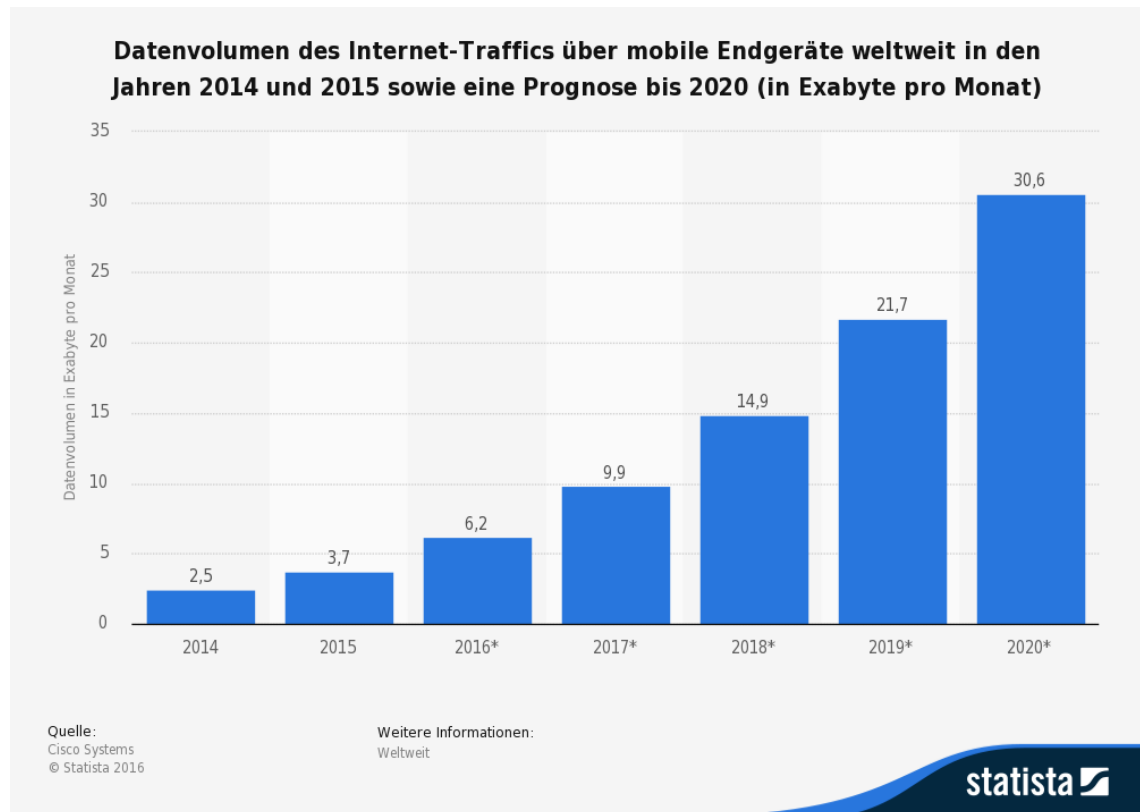
<sup>4</sup> Lipinski, K. - Daten. Von IT Wissen

<sup>5</sup> Golem Media GmbH - Mobile Datennutzung legt um das Zehnfache zu

<sup>6</sup> Lück, B., & Donner, A. - Datenverkehr wächst bis 2018 auf das Dreifache



jeder Mensch im Durchschnitt 1,7 Geräte, die vernetzt sind. 2018 soll jeder bereits 2,7 Geräte besitzen, die laufend Daten senden und empfangen.



**Abbildung 1:** Datenvolumen Prognose bis 2020<sup>7</sup>

Die Daten müssen oft in Entscheidungsprozessen innerhalb eines Unternehmen miteinfließen. Damit dies gelingt, sind sehr leistungsfähige Netze notwendig.<sup>8</sup> Die Service Provider, die die Infrastruktur und die Dienste anbieten, müssen sich den neuen Anforderungen stellen. Sie müssen ihre Netzwerke ausbauen und gleichzeitig die Sicherheitsmaßnahmen erhöhen, da mehr Daten auch gleichzeitig die evtl. Schäden erhöhen, die durch Dritte zugefügt werden können. Des Weiteren muss die Bandbreite der Netzwerke ausgebaut werden um den erhöhten Datenfluss reibungslos zu gewährleisten.

<sup>7</sup> Statista (2017) - Prognose zum Datenträffic über mobile Geräte weltweit bis 2020

Quelle der Grafik:

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/172511/umfrage/prognose---entwicklung-mobiler-datenverkehr/>

<sup>8</sup> Lück, B., & Donner, A. - Datenverkehr wächst bis 2018 auf das Dreifache

## 2.2 Übertragungsgeschwindigkeit

<sup>9</sup>Wenn von der Übertragungsgeschwindigkeit in der Informatik gesprochen wird, ist meistens die Bandbreite gemeint. Dies beschreibt den Frequenzbereich, also wieviel Daten pro Übertragung transportiert werden können. Dies entspricht dem Unterschied zwischen der größten und der kleinsten Frequenz. Je größer die Bandbreite ist, desto mehr Daten können übertragen werden.

Die Bandbreite wird meistens in Bit/s, kBit/s, MBit/s, GBit/s usw. angegeben. Die Übertragungsgeschwindigkeit hängt von 3 Faktoren ab:

- $v_s$  = Schrittgeschwindigkeit  
Abstand von zwei Zustandsänderungen von einem Signal. Z.B. können Binäre Signale nur 2 Zustände besitzen, 1 oder 0. Die Dauer, wie lange so ein Kennzustand anhält, nennt man Schrittdauer.
- $m$  = Anzahl der Übertragungskanäle
- $n$  = Anzahl der Kennzustände

Um die Übertragungsgeschwindigkeit zu errechnen benutzt man die Formel:

$$V_D = m * v_s * \log^2 n$$

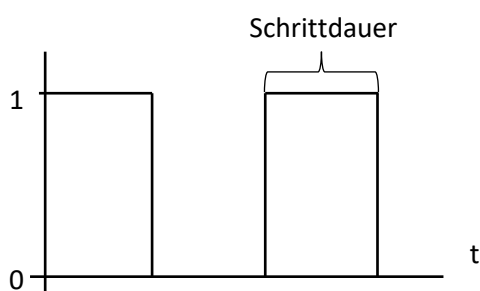


Abbildung 3: Binäre Übertragung

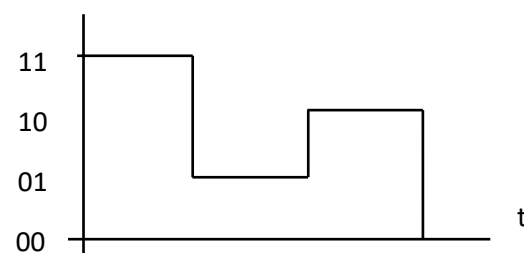


Abbildung 2: Quaternäre Übertragung

<sup>9</sup> Schnabel, P. - Übertragungsgeschwindigkeit und Datenrate

Damit eine annehmbare Übertragungsgeschwindigkeit erreicht werden kann, müssen mehrere Kennzustände während einer Schrittdauer ermöglicht werden. Somit kann bei jeder Verdoppelung der Geschwindigkeit die Anzahl der Bits um 1 erhöht werden.

In der folgenden Tabelle sind alle herkömmlichen Übertragungsgeschwindigkeiten aufgelistet mit je ihrer theoretischen Übertragungsrate, die meistens nur im Labor erreicht werden kann und dem praktischen Maximum, der real erzeugt werden kann.

Bezeichnung	theoretisches Maximum	praktisches Maximum
SATA II	3 GBit/s	280 MByte/s
SATA 6G	6 GBit/s	350 MByte/s
USB 3.0	5 GBit/s	200 MByte/s
USB 2.0	480 MBit/s	36 MByte/s
USB 1.1	12 MBit/s	1,2 MByte/s
Gigabit Ethernet	1 GBit/s	117 MByte/s
Fast Ethernet	100 MBit/s	11,8 MByte/s
VDSL (Downstream)	50 MBit/s	
DSL mit 16 MBit/s (Downstream)	16 MBit/s	1,9 MByte/s
DSL mit 6 MBit/s (Downstream)	6 MBit/s	0,7 MByte/s
UMTS/HSDPA mit 7,2 MBit/s	7,2 MBit/s	0,8 MByte/s
UMTS/HSDPA mit 3,2 MBit/s	3,2 MBit/s	0,4 MByte/s

**Tabelle 1:** Übertragungsgeschwindigkeiten im Vergleich<sup>10</sup>

<sup>10</sup> Schnabel, P. (2017) - Übertragungsgeschwindigkeit und Datenrate

Quelle der Tabelle:

<http://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/0212095.htm>

## 2.3 Herkömmliche Datenübertragungsarten

<sup>11</sup>Eine Datenübertragung findet statt, wenn Daten bzw. Informationen von einem Sender zu einem Empfänger übermittelt werden. Es gibt verschiedene Techniken, um Daten an den Empfänger zu senden. Die Informationen können durch,

- Elektrische Signale
- Optische Signale oder
- Elektromagnetischen Wellen

übertragen werden. Signale sind laut der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE:

*„Physikalische Größe, bei der ein oder mehrere Parameter Information über eine oder mehrere variable Größen tragen“*

### 2.3.1 Elektrische Signale

<sup>12</sup>Ein elektronisches Signal kann als Messgröße die Stromstärke, die Spannung oder den Widerstand besitzen. Auf einer Zeitfunktion, lassen sich die veränderten Messgrößen beschreiben. Die Daten der Signale lassen sich decodieren, indem man die Änderungen der Amplituden misst.

<sup>13</sup>Deterministische Signale können mit Funktionen beschrieben werden und mathematisch berechnet werden. Stochastische Signale sind zufällig und lassen sich somit nicht genau berechnen, sondern können nur Mithilfe von Statischen Methoden (z.B. Mittelwert) beschreiben werden.

---

<sup>11</sup> Schnabel, P. - Datenübertragung

<sup>12</sup> Germer, H., & Wefers, N. - Messelektronik

<sup>13</sup> Mietke, D. - Elektrische Signale

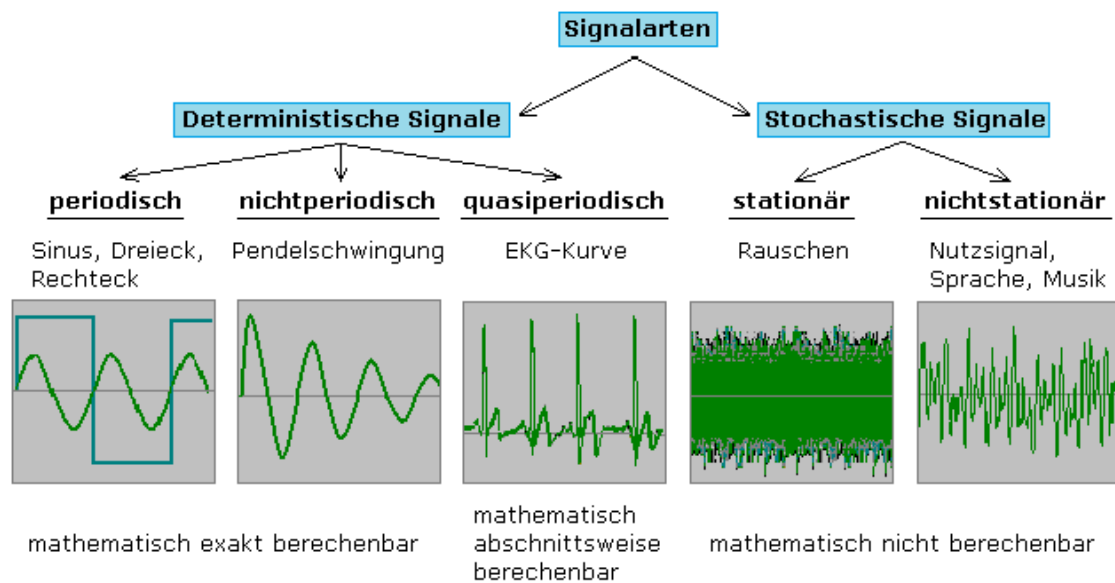


Abbildung 4: Elektrische Signalarten

14

### 2.3.2 Optische Signale

<sup>15</sup>Dies ist eines der ältesten Signal Übertragungsarten. Bereits vor hunderten von Jahren, hat der Mensch z.B. Rauchsignale benutzt, um über weite Distanzen miteinander zu Kommunizieren. Heutzutage ist mit Optischen Signalen meistens die Übertragung von Informationen über Glasfaserkabel gemeint.

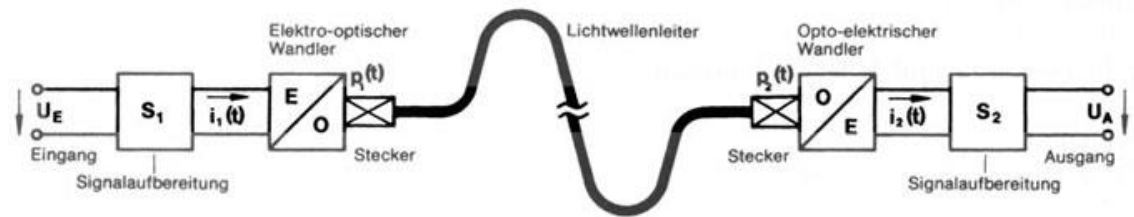
Auf der Senderseite wird ein elektronisches Signal mittels eines Lichtimpuls einer LED erzeugt. Ein Glasfaserkabel transportiert dieses Lichtsignal zum Empfänger. Da Lichtimpulse nicht lang genug gespeichert werden können, damit alle Informationen daraus entnommen werden können, muss das Lichtsignal beim Empfänger mithilfe einer optisch/elektrisch Signalumwandlung umgewandelt werden.

<sup>14</sup> Mietke D. - Elektrische Signale

Quelle der Grafik:

[http://elektroniktutor.de/signalkunde/sig\\_pict/signale.png](http://elektroniktutor.de/signalkunde/sig_pict/signale.png)

<sup>15</sup> Wrobel, C. - Optische Übertragung



**Abbildung 5:** Optische Signalübertragung

<sup>16</sup>

<sup>17</sup>Diese Technik hat einige Vorteile:

- Hohe Übertragungsrate
- Geringerer Kabeldurchschnitt im Vergleich zu Kupfer
- Sehr geringe <sup>18</sup>dB
- Unanfällig gegenüber Elektrischen und Magnetischen Störungen

### 2.3.3 Elektromagnetischen Wellen

Diese Technik wurde von <sup>19</sup>Heinrich Hertz entdeckt. <sup>20</sup>Dabei breiten sich in einem bestimmten Bereich elektromagnetische Wellen in Lichtgeschwindigkeit aus. Es gibt dabei viele verschiedene Frequenzen und Wellenlängen, die jeweils für was Anderes genutzt werden können bzw. auch andere Eigenschaften besitzen.

<sup>21</sup>Niederfrequente elektromagnetischen Wellen eignen sich perfekt, um Informationen z.B. Töne zu übertragen. Dabei werden diese mit einem Mikrophon aufgenommen und in Schwingungen umgewandelt. Allerdings haben langwellige elektromagnetischen Wellen keine guten Ausbreitungseigenschaften. Dagegen können

<sup>16</sup> DATAKONTEXT GmbH (2010) - Optische Übertragung

Quelle vom Bild:

[http://www.secupedia.info/w/images/8/84/Optische\\_uebertragung.jpg](http://www.secupedia.info/w/images/8/84/Optische_uebertragung.jpg)

<sup>17</sup> Schnabel, P. - Optische Übertragungssysteme

<sup>18</sup> Lichtverlust wird als Dämpfung bezeichnet und in Dezibel angegeben. Bei 20 dB kommt nur ein Hundertstel der Sendeenergie durch. Durch diese Dämpfung ist auch die maximale Länge einer Übertragung begrenzt, da sie mit steigender Länge wächst.

<sup>19</sup> Heinrich Rudolf Hertz, 22.02.1857 – 01.01.1894, war ein Physiker. Er war der erste, der 1886 elektromagnetische Wellen erzeugen und nachweisen konnte.

<sup>20</sup> Hans, M. - Kommunikation mit Hertzschen (elektromagnetischen) Wellen

<sup>21</sup> Bibliographisches Institut GmbH - Informationsübertragung mit Hertzschen Wellen

Hochfrequente elektromagnetischen Wellen sehr leicht versendet werden. Allerdings können mit Ihnen keine Daten versendet werden.

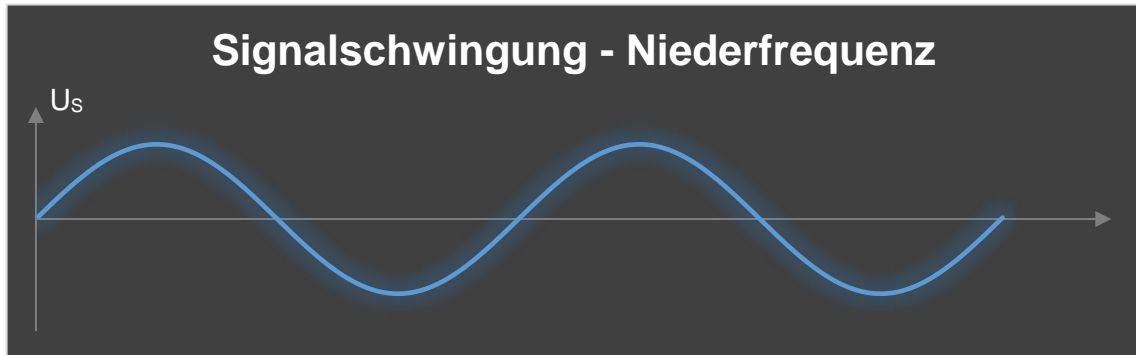


Abbildung 6: Signalschwingung

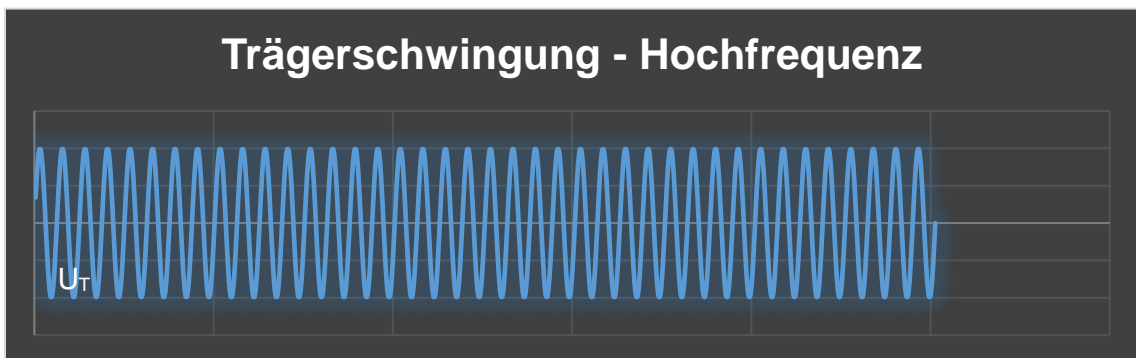


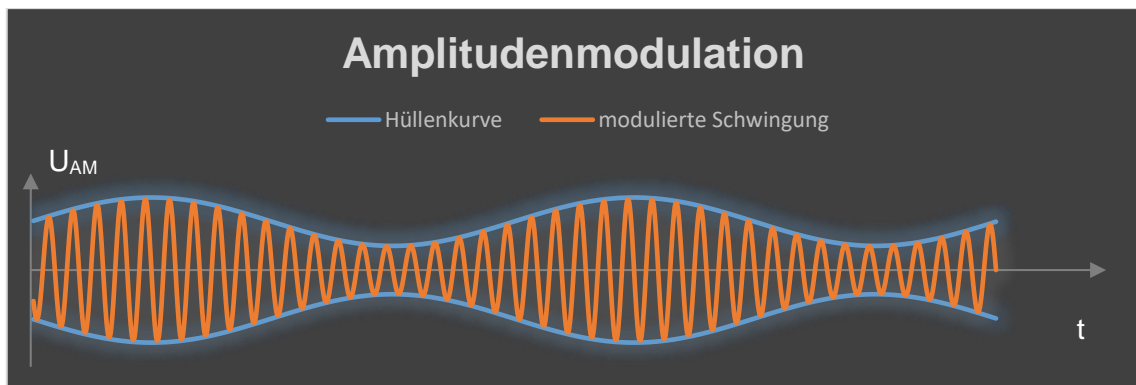
Abbildung 7: Trägerschwingung

<sup>22</sup>Damit trotzdem Informationen mit dieser Technik versendet werden können, müssen beide Wellenarten verwendet werden. Dazu werden von hochfrequenten Schwingungen Schwingkreise erzeugt. Die Informationen der niederfrequenten elektromagnetischen Wellen werden auf die hochfrequenten Schwingungen moduliert.

<sup>23</sup>Eine Modulation bezeichnet ein Verfahren, indem eine hochfrequente Schwingung mithilfe einer niederfrequenten Schwingung so verändert wird, dass die Informationen in den hochfrequenten Schwingungen transportiert werden. Eine Variante dieser Modulation ist die Amplitudenmodulation. Diese Variante ist auch unter der Abkürzung AM bekannt und wird auch Mittelwelle genannt.

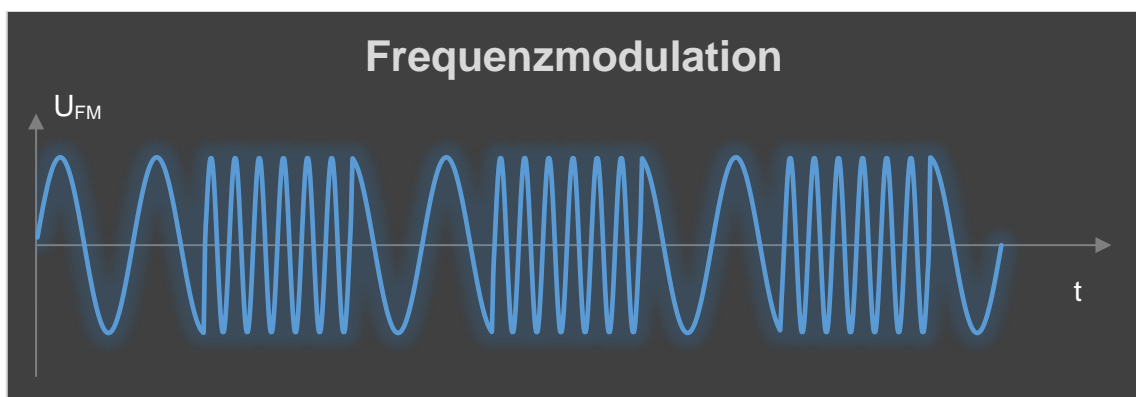
<sup>22</sup> Bibliographisches Institut GmbH - Informationsübertragung mit Hertzschen Wellen

<sup>23</sup> Winter, R. - Informationsübertragung mit elektromagnetischen Wellen



**Abbildung 8:** Amplitudenmodulation

<sup>24</sup>Eine weitere Variante der Modulation ist die Frequenzmodulation. Sie wird FM abgekürzt und oft einfach als Kurzwelle bezeichnet. Sie ist weniger störanfällig als die AM Variante. Bei dieser Variante bleiben die Amplituden konstant, allerdings ändert sich die Frequenz. Diese Änderung hängt von der zu übermittelnden Nachricht ab.



**Abbildung 9:** Frequenzmodulation

<sup>24</sup> Helmich, U. - Frequenzmodulation. Von Helmichs Biologie-Lexikon



## 3 Quantenphysik

<sup>25</sup>Das Ziel der Quantenphysik war es, physikalische Vorgängen auf atomarer Größenordnung zu beschreiben. Besonders in Gebieten, wo die klassische Physik versagte, wurde versucht, mithilfe der Quantenphysik eine Lösung herzuleiten. Die klassische Physik ist bei der Beschreibung des Lichtes oder aber auch beim Aufbau der Materie an ihre Grenze gekommen. Als Beispiel dazu gibt es das das Doppelspalt-Experiment (3.1 Das Doppelspalt-Experiment).

Obwohl sich die Quantenobjekte in unserer Vorstellung, völlig widersprechen, sind es die am besten bewiesenen Theorien. Die Quantenphysik setzt sich aus zwei Teilbereichen der theoretischen Physik zusammen:

- Quantenmechanik – untersucht das Verhalten von Quantenobjekten
- Quantenfeldtheorie – auch Felder werden als Quantenobjekten untersucht

Die Quantenphysik beruht auf den sog. Quanten (3.2 Quanten). Sie sind die kleinsten uns bekannten Objekte. Ein besonderes Elementarteilchen dabei ist das Photon (3.3.2 Photonen), da es keine Masse und keine Ladung besitzt. Dadurch hat es eine unendliche Reichweite. Ein weiteres wichtiges ist das Elektron (3.3.1 Elektronen). Es ist eines der Bestandteile von Atomen und wird häufig in der Quantenphysik benutzt. Einher mit der Quantenphysik gibt es auch sog. Quantenbits (3.4 Quantenbit). Diese sind im Grunde wie normale Bits, funktionieren allerdings mit Quanten.

<sup>26</sup>Die Quantenphysik befasst sich unter anderen mit folgenden Fragen:

- *Wie reagieren subatomare Teilchen auf Kräfte von außerhalb?*
- *Welche Energien werden dabei frei?*
- *Können wir das Verhalten von Mikroobjekten beschreiben?*
- *Welche Gesetze gelten für die mikroskopische Welt?*
- *Was für Auswirkungen haben sie auf die makroskopische Welt, sprich auf das was wir in unserer Welt sehen können?*

---

<sup>25</sup> Meßinger-Koppelt, J. - Quantenphysik

<sup>26</sup> Teider, O. - Ursprünge der Quantentheorie

<sup>27</sup>Um klar zu machen, wie weit die Quantenphysik von der klassischen Physik abweicht, folgt hier jetzt ein Beispiel Thema der Quantenphysik. Ein Teil der Experten ist sich sicher, dass die quantenphysikalischen Erscheinungen nicht auf Sichtbare Weise auf unsere Welt auswirken. Allerdings glaubt der andere Teil, dass sich das Verhalten der Quanten alleine durch unser Bewusstsein verändern lassen. Wenn dies stimmen sollte, dann stellt dies unsere gesamte Physik auf den Kopf. Wir könnten unsere Erlebte Realität alleine durch unser Bewusstsein verändern. <sup>28</sup>Niels Bohr sagte über die Quantenphysik einen sehr treffenden Satz:

*„Wer über die Quantentheorie nicht entsetzt ist, der hat sie möglicherweise nicht verstanden!“*

### 3.1 Das Doppelspalt-Experiment

<sup>29</sup>Dieses ist das wohl meist zitierte Experiment in der Quantenphysik. <sup>30</sup>Richard Feynman sagte zu diesem:

*„Das Doppelspaltexperiment enthält das ganze Geheimnis der Quantenmechanik. Sämtliche Paradoxe, Geheimnisse und Absonderlichkeiten der Natur sind darin enthalten. Bei jeder x-beliebigen anderen Situation in der Quantenmechanik genügt dann der Hinweis: Sie erinnern sich an das Experiment mit den zwei Löchern“.*

<sup>31</sup>Dieses Experiment wurde erstmals 1802 von Thomas Young durchgeführt um die Wellentheorie des Lichtes zu beweisen. Dazu wurde vor einer Lichtquelle eine Platte mit zwei Spalten, die sich nebeneinander befinden, aufgebaut durch die das Licht hindurchmusste. Dahinter befand sich eine Fotoplatte auf der das Licht trifft und angezeigt wurde. Da Licht sich wellenartig ausbreitet, sieht man auf der hinteren Platte als Ergebnis

---

<sup>27</sup> Welz, O. - Quantentheorie / Quantenphysik einfach erklärt

<sup>28</sup> Niels Henrik David Bohr, 07.10.1885 – 18.11.1962, war ein Physiker. Er erhielt 1922 einen Nobelpreis für seine Verdienste um die Erforschung der Struktur der Atome und der von ihnen ausgehenden Strahlung

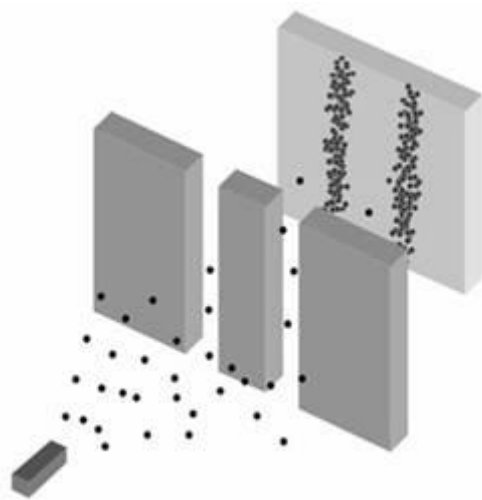
<sup>29</sup> Wolf, P. - Der Doppelspalt

<sup>30</sup> Richard Phillips Feynman, 11.05.1918 – 15.02.1988, war ein Physiker und bekam 1965 den Nobelpreis für seine Arbeit an der Quantenelektrodynamik

<sup>31</sup> Embacher, F. - Über die Welt der Quantentheorie

mehrere Streifen, obwohl das Licht nur durch zwei Spalten durchgekommen ist (Abbildung 11: Doppelspalt – Wellen). Dies liegt daran, dass sich die Wellen gegenseitig überlagern. Licht verhält sich somit anders als Teilchen. Wenn Teilchen durch den Doppelspalt geschossen werden, dann entsteht an der hinteren Platte nur zwei Streifen (Abbildung 10: Doppelspalt – Teilchen).

In der klassischen Physik gibt es entweder Teilchen, z.B. Sandkörner oder Wellen, z.B. Licht.



**Abbildung 11:** Doppelspalt – Wellen<sup>32</sup>



**Abbildung 10:** Doppelspalt – Teilchen<sup>32</sup>

<sup>33</sup>Wenn nun allerdings Elektronen, dies sind winzige Bestandteile von Materie, durch diese Spalten geschossen werden, wird eigentlich erwartet, dass diese sich wie Teilchen verhalten. Dies ist aber nicht so. Es entsteht an der hinteren Platte wieder eine Interferenz wie bei Wellen, obwohl die Elektronen einzeln abgeschossen worden sind so wie Teilchen (Abbildung 12: Doppelspalt – Quanten). Um festzustellen durch welchen Schlitz wie viele Elektronen kommen, stellten die Wissenschaftler ein Messgerät auf um dies festzustellen. Dieses Mal war das Muster auf der Platte so, als hätte man das

<sup>32</sup> Kofler J. (2011) - Den Quanten auf der Spur – von der Grundlagenforschung zum Quantencomputer; S.12;  
Quelle vom Bild:

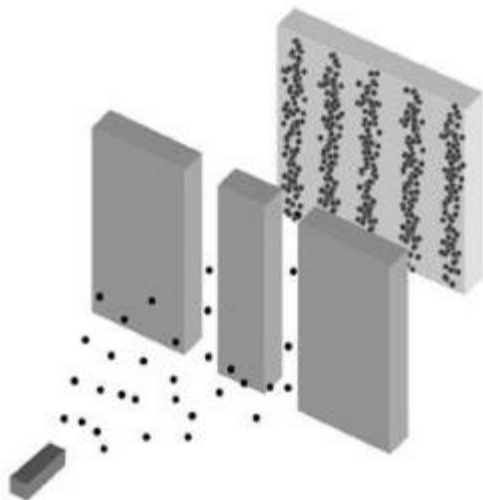
[http://www2.mpg.de/~jkofler/Files/Talks/Kofler%20\(2011\)%20-%20Den%20Quanten%20auf%20der%20Spur%20-%20von%20der%20Grundlagenforschung%20zum%20Quantencomputer.pdf](http://www2.mpg.de/~jkofler/Files/Talks/Kofler%20(2011)%20-%20Den%20Quanten%20auf%20der%20Spur%20-%20von%20der%20Grundlagenforschung%20zum%20Quantencomputer.pdf)

<sup>33</sup> Kofler, J. - Den Quanten auf der Spur - von der Grundlagenforschung zum Quantencomputer

Experiment mit Teilchen gemacht. Anscheinend lassen sich die Elektronen, nur durchs beobachten bzw. messen, beeinflussen. Im unbeobachtete Fall hat ein Elektron folgende Möglichkeiten durch die Spalten zu gelangen:

- Linker Spalt
- Rechter Spalt
- Beide Spalte
- Kein Spalt

<sup>34</sup>All diese Möglichkeiten stehen in Superposition zueinander, sprich sie überlagern sich. In der klassischen Physik besitzt jedes Objekt klar definierbare Eigenschaften, die bereits vorm Messen feststehen. In der Quantenphysik werden Eigenschaften erst durch eine Messung festgelegt. Dies stellt die Wissenschaft bis heute vor große Rätsel. Somit stellt sich bis heute die Frage: Was ist Materie? Sind es Teilchen oder Wellen?



**Abbildung 12:** Doppelspalt – Quanten (unbeobachtet)<sup>35</sup>

---

<sup>34</sup> Kofler, J. - Den Quanten auf der Spur - von der Grundlagenforschung zum Quantencomputer

<sup>35</sup> Kofler J. (2011) - Den Quanten auf der Spur – von der Grundlagenforschung zum Quantencomputer; S.12;  
Quelle vom Bild:

[http://www2.mpg.de/~jkofler/Files/Talks/Kofler%20\(2011\)%20-%20Den%20Quanten%20auf%20der%20Spur%20-%20von%20der%20Grundlagenforschung%20zum%20Quantencomputer.pdf](http://www2.mpg.de/~jkofler/Files/Talks/Kofler%20(2011)%20-%20Den%20Quanten%20auf%20der%20Spur%20-%20von%20der%20Grundlagenforschung%20zum%20Quantencomputer.pdf)

## 3.2 Quanten

<sup>36</sup>Der Begriff der Quanten wurde zum ersten Mal 1877 von <sup>37</sup>Ludwig Boltzmann benutzt. Er berechnet die statistische Verteilung der Energie von Gasmolekülen. Er benutzte als Rechengröße den Begriff Energiequanten. Der Begriff Quanten kommt aus dem lateinischen und heißt übersetzt: „wie groß, wie viel“. Allerdings war dies für ihn einfach nur eine Rechengröße und noch keine eigene Wissenschaft.

Als Ursprung der Quantenphysik gilt der Vortrag von <sup>38</sup>Max Planck, den er am 14.09.1900 hielt. Er hatte den Titel: "Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum". 1905 bestätigte Albert Einstein, dass Quanten nicht nur eine Rechengröße sind, sondern wirklich existieren. Dies gelang ihm, bei der Untersuchung des Photoeffekts. <sup>39</sup>Der Photoeffekt tritt ein, wenn Metall solange bestrahlt mit Licht wird, bis sich die Elektronen herauslösen.

<sup>40</sup>Der Begriff „Quanten“ bezieht sich also entweder auf die kleinste Energieeinheit, die von einem System zu einem anderen übertragen werden kann oder aber er wird oft für den Begriff der Elementarteilchen benutzt.

## 3.3 Elementarteilchen

<sup>41</sup>Früher wurde angenommen, dass Atome die kleinsten Bausteine sind. Das ist nicht so ist wurde erst Anfang des letzten Jahrhunderts festgestellt. Es gibt noch kleinere Teilchen, wie z.B. Elektronen oder Photonen. Diese gehören zu den Elementarteilchen. Dies sind die kleinsten Bestandteile der Materie. Neben diesen beiden sind bis heute über 200 verschiedene Elementarteilchen bekannt. Manche Elementarteilchen lassen sich in noch kleineren Teilchen zerteilen, in sog. Quarks.

---

<sup>36</sup> Teider, O. - Ursprünge der Quantentheorie

<sup>37</sup> Ludwig Eduard Boltzmann, 20.02.1844 – 05.09.1906, war ein Physiker und Philosoph. Er war einer der größten Verfechter des Atomismus

<sup>38</sup> Max Karl Ernst Ludwig Planck, 23.04.1858 – 04.10.1947, war ein Physiker und gilt als Begründer der Quantenphysik

<sup>39</sup> Keil, D. - Photoeffekt

<sup>40</sup> Sturm, G. - Was sind Quanten?

<sup>41</sup> Bibliographisches Institut GmbH - Elementarteilchen

Das folgende Schaubild, zeigt die Elementarteilchen im Standardmodell. Die Bosonen (rote und gelbe Teilchen) sind die einzigen Teilchen, die Kräfte durch Teilchen übertragen können. Da alle anderen Teilchen (Lila und Grüne Teilchen) einen Spin von  $\frac{1}{2}$  haben, bezeichnet man diese auch als Fermionen. Diese Fermionen bilden unsere umgebende Materie.

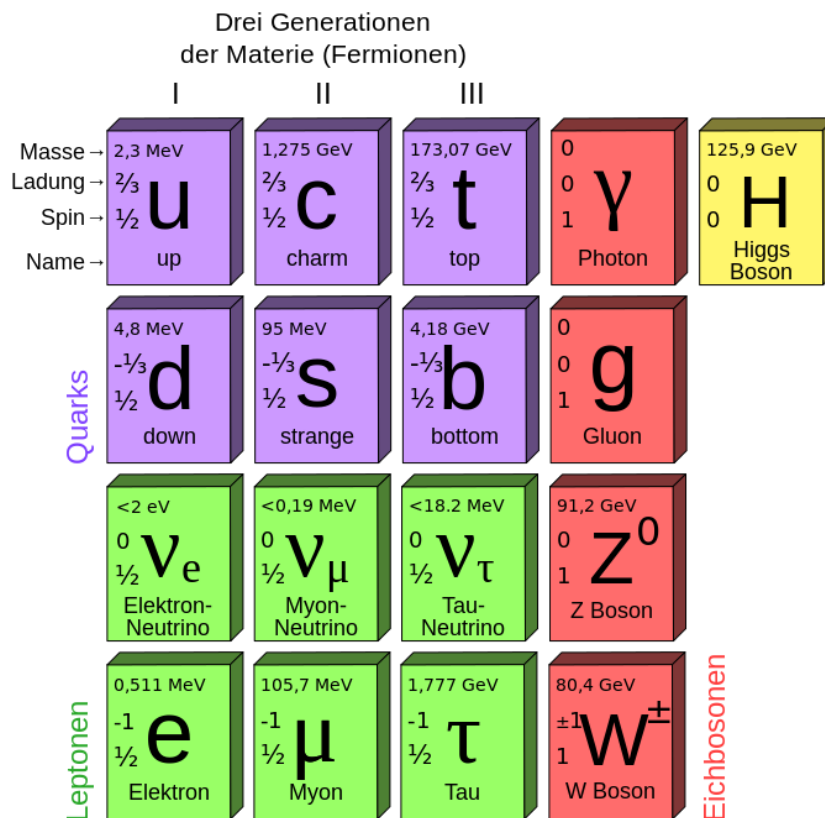


Abbildung 13: Elementarteilchen im Standardmodell <sup>42</sup>

<sup>42</sup> MissMJ (2010) - Standard Model of Elementary Particles

Quelle vom Bild:

[https://de.wikipedia.org/wiki/Elementarteilchen#/media/File:Standard\\_Model\\_of\\_Elementary\\_Particles-de.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Elementarteilchen#/media/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg)

### 3.3.1 Elektronen

<sup>43</sup>Das Elektron, ist eines der Bestandteile von Atomen. Sie können allerdings auch ungebunden von einem Atom erschienenen. Es ist das leichteste elektrisch geladene Elementarteilchen und sehr stabil (es wurde bisher kein zerfall von einem Elektron beobachtet).

Es ist das uns am längsten bekannte Elementarteilchen. Es wurde bereits im 19. Jahrhundert von <sup>44</sup>Joseph Thomson entdeckt. <sup>45</sup>Er bewies, dass die Strahlung, die aus Glühkathoden kommen, Teilchen sind. Diese nannte er Elektronen.

<sup>46</sup>Jedes elektrische Ereignis, was wir wahrnehmen, beruht auf Elektronen, die sich bewegen. Die Richtung in der sich Elektronen bewegen nennt sich Stromfluss. Wenn einem Objekt Elektronen zugeführt werden lädt dieses sich positiv auf. Wenn ihm wieder welche abgenommen werden lädt das Objekt sich negativ auf.

### 3.3.2 Photonen

<sup>47</sup>Unser Licht besteht aus Photonen. Diese sind Elementarteilchen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Photon kommt aus dem griechischen und heißt übersetzt Licht. Aus diesem Grund werden sie auch als Lichtquanten bezeichnet.

<sup>48</sup>Photonen entstehen, wenn einem Gegenstand und gleichzeitig somit auch dessen Atomen, Energie zugeführt werden. Dies kann durch Licht oder durch Wärme geschehen. Wenn dies passiert, kommen die Elektronen in einen energetisch höheren Zustand. Somit besitzen sie mehr Energie als zuvor. Die Elektronen bleiben allerdings nicht in diesem Zustand, sondern gelangen ohne Einwirken von außen, innerhalb von Milliardstel einer Sekunde, in ihren Ausgangszustand zurück. Die Energie, die sie davor aufgenommen haben, wird wieder abgegeben. Dies nehmen wir als Licht war.

---

<sup>43</sup> Spektrum Akademischer Verlag - Das rätselhafte Elektron

<sup>44</sup> Joseph J. Thomson, 18.12.1856 – 30.08.1940, entdeckte als erster, dass Atome teilbar sind

<sup>45</sup> Schulz, J. - Das Thomsonsche Atommodell

<sup>46</sup> Konradin Medien GmbH - Elektron

<sup>47</sup> Bäker, M. - Was ist ein Photon?

<sup>48</sup> Bibliographisches Institut GmbH - Photonen

### 3.4 Quantenbit

<sup>49</sup>Quantenbits werden auch Qubits genannt und besitzen eine binäre Struktur. Sie können somit entweder den Wert 1 oder 0 besitzen. Ein Qubit entspricht genau einem Teilchen. Dies kann z.B. ein Atom, ein Elektron oder auch ein Photon sein. Qubits sind nie definiert, im Gegensatz zu herkömmlichen elektronischen Bits. Diese besitzen immer einen Zustand 1 oder 0, egal zu welchem Zeitpunkt. Qubits dagegen nehmen erst ihren Wert, nach einer Messung an.

<sup>50</sup>Die Werte in einem Qubit können durch verschiedene Zustände des Teilchens dargestellt werden. Beispielsweise kann der Wert 1 in einem Qubit horizontale Polarisierung und 0 vertikale Polarisierung sein oder aber auch die Spin Orientierung eines Elektrons.

---

<sup>49</sup> Schnabel, P. - Quantenphysik

<sup>50</sup> Spektrum Akademischer Verlag - Qubit



## 4 Quantenteleportation

Die Quanten-Teleportation, widerspricht dem Prinzip der Relativitätstheorie von <sup>51</sup>Albert Einstein, dass sich nichts schneller bewegen kann als das Licht.

<sup>52</sup>Um ein Objekt beamen zu können, müsste man diesen Komplette scannen und den exakten Ort und seinen exakten Impuls bestimmen. Laut der <sup>53</sup>Heisenbergsche Unschärferelation, ist dies aber beides zur gleichen Zeit nie möglich. Sie ist eine der fundamentalsten Prinzipien der Quantenmechanik. Jeder Steigerung der Genauigkeit um die Position genauer zu bestimmen, verschlechtert die Genauigkeit bei der Bestimmung des Impulses und auch umgekehrt. Das liegt daran, dass Ort und Geschwindigkeit, mit der sich ein Atom, oder ein Elektron, sich bewegt, immer in gewisser Weise Unbestimmbar ist.

<sup>54</sup>Allerdings entdeckte ein Forscherteam 1993, wie sie die Quantenmechanik selbst für eine Teleportation benutzen konnten. Diese besondere Eigenart der Quantenmechanik heißt „Verschränkung“ (4.1 Quantenverschränkung). Das Team bestand aus Charles H. Bennett von IBM, Asher Peres von Technion<sup>55</sup>, William K. Wootters vom Williams College sowie aus Gilles Brassard, Claude Crépeau und Richard Josza von der Universität Montreal. Wie solche Systeme entstehen wird in Kapitel 4.2 (4.2 Entstehung verschränkter Systeme) erklärt. <sup>56</sup>Anton Zeilinger nutzte dieses Phänomen und führte mit seinem Team 1997 die erste Teleportation über ein Glasfasernetzwerk aus (4.3 Teleportation Versuchsaufbau). Durch diesen Erfolg ist ein Wettlauf entstanden und im Kapitel 4.4 werden aktuelle Fortschritte (4.4 Fortschritte bei der Teleportation) in der Quantenteleportation aufgezeigt. Zwei besondere Fortschritte sind der Quantenrepeater (4.5 Quantenrepeater), der eine Teleportation, mithilfe von Glasfaserkabeln, über einer längeren Entfernung ermöglicht und die Quantenkryptografie (4.6 Quantenkryptografie), die diesen Kommunikationsweg abhörsicher macht.

---

<sup>51</sup> Albert Einstein, 14.03.1879 – 18.04.1955, er war einer der wegweisendsten Physiker. Er beschäftigte sich unter anderen mit Raum, Zeit und Struktur von Materie. Er begründete einige der anerkanntesten Theorien der Physik.

<sup>52</sup> Rudolph, D. - Werner Heisenberg Unschärferelation

<sup>53</sup> Werner Heisenberg, 05.12.1901 – 01.02.1976, 1925 formulierte er die erste mathematische Definition von der Quantenmechanik und bekam dafür den Nobelpreis der Physik

<sup>54</sup> Spektrum Akademischer Verlag - Quanten-Teleportation

<sup>55</sup> Technion ist ein israelisches Technologie-Institut

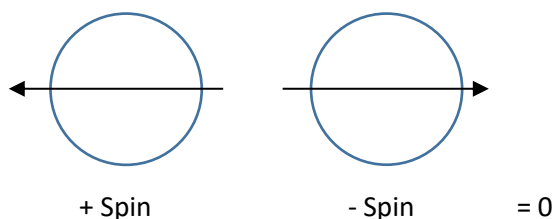
<sup>56</sup> Anton Zeilinger, (g20.05.1945), ist ein Quantenphysiker und arbeitete an der Universität Wien

## 4.1 Quantenverschränkung

<sup>57</sup>Jedes Teilchen besitzt einen sogenannten Spin. Dieser beschreibt die Drehrichtung eines Teilchens, also ob es sich beispielsweise nach links oder nach rechts dreht.

<sup>58</sup>Wenn nun ein Elektron erzeugt wird, weiß man nicht welchen Spin dieses besitzt. Es befinden sich in der Superposition und hat somit noch keinen festbestimmbaren Spin, sondern besitzt beide. Dies ist ein riesen Unterschied zur klassischen Physik. Dort besitzt jeder Gegenstand bereits einen Zustand, nicht so in der Quantenphysik. Dort wird dieser erst durch eine Messung festgelegt. Weshalb dies so ist weiß bisher niemand. Es ermöglicht jedoch viele interessante Experimente wie z.B. die Quantenteleportation.

<sup>59</sup>Angenommen wir hätten nun Beispielsweise zwei Elektronen, wobei sich das eine linksherum und das andere genauso schnell rechtsherum dreht, dann hat das eine einen positiven Spin und das andere einen genauso großen negativen Spin. Diese Werte aufeinander addiert ergeben einen Spin von Null. Ist dies der Fall, dann sind die Elektronen miteinander verschränkt. Diese Eigenschaft des Verschränkt seins, hat folgenden Effekt: Wenn nun Beispielsweise der Spin vom ersten Elektron von positiv auf negativ geändert wird, dann ändert sich automatisch der Spin des zweiten Photons auf des gegensätzliche, in diesem Fall zu positiv. Dies passiert, ohne das die Elektronen in irgendeiner Weise miteinander kommunizieren.



**Abbildung 14:** Quantenverschränkung zweier Elektronen

---

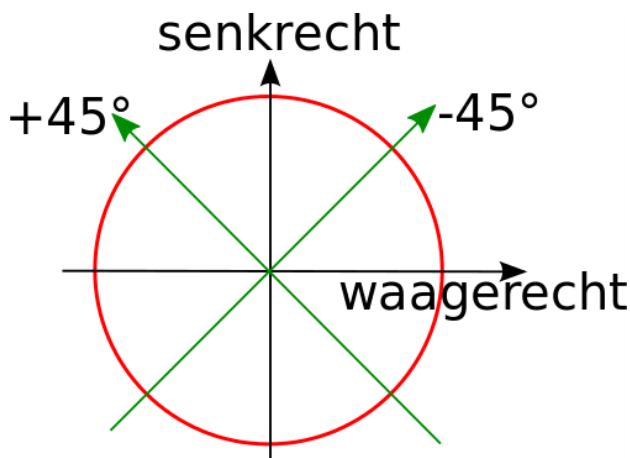
<sup>57</sup> Aigner, F., & Grafenhofer, D. - Quanten und Stehlampen

<sup>58</sup> Bäker, M. - Quantenmechanik verstehen III – Verschränkung

<sup>59</sup> Aigner, F., & Grafenhofer, D. - Quanten und Stehlampen

<sup>60</sup>Besonders interessant, ist dieser Effekt bei riesigen Distanzen. Angenommen das eine Elektron befindet sich auf der Erde und das andere befindet sich irgendwo in der Milchstraße, also einige Tausend Lichtjahre entfernt. Dies bedeutet, dass unter normalen Umständen, wenn die Spin Richtung beim Elektron auf der Erde geändert werden würde, es einige Tausend Jahre dauern würde, bis die Änderungs-Information mit Lichtgeschwindigkeit vom einem zum anderen Elektron gelangt. Doch bei der Quantenverschränkung passiert dies allerdings genau im selben Moment, wo die Spin Richtung beim Elektron auf der Erde geändert wird.

<sup>61</sup>Was hier beispielhaft mit Elektronen vorgestellt wurde, funktioniert auch mit Photonen. Diese besitzen eine Polarisierung. Damit zwei Photonen miteinander verschränkt sind, müssen die Polarisations Ebenen von beiden senkrecht aufeinander stehen.



**Abbildung 15:** Polarisationszustände von Photonen<sup>62</sup>

<sup>60</sup> Zeilinger, A. - Quanten-Teleportation

<sup>61</sup> Angerer, E., Kröpfel, J., Bartussek, V., Herper, J., & C. Möstl. - Quantenteleportation

<sup>62</sup> Bäker M. (2013) - Quantenmechanik verstehen III – Verschränkung

Quelle der Grafik:

<http://scienceblogs.de/hier-wohnen-drachen/files/2013/01/zweizustandPolarisation.png>

<sup>63</sup>Obwohl sich beide Photonen gegenseitig beeinflussen lassen, lassen sich keine Informationen übertragen. Dies kann nicht gelingen, da:

- quantenmechanische Messungen sagen nur etwas darüber aus, was zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit als Ergebnis rauskommen könnte
- Das <sup>64</sup>No-Cloning-Theorem untersagt, die Überprüfung von Quantenverschränkten Zuständen

Um die Quantenteleportation als Kommunikationstechnik zu benutzen, benötigt man viel Photonen. Normalerweise werden dazu Photonen benutzt, da sie gut durch Glasfasern oder der Luft mithilfe von Teleskopen transportiert und gemessen werden können. Jedes Photon steht dabei für ein Bit Wert, der z.B. anhand dessen Polarisation gemessen werden kann. Somit können aus vielen Photonen eine Bit Nachricht übermittelt werden.

## 4.2 Entstehung verschränkter Systeme

<sup>65</sup>Um ein verschränktes Photonenpaar zu erzeugen, wird Parametrische Fluoreszenz benutzt. Dazu wird ein nichtlinearer optischer Kristall benötigt, auf den ein Laser abgefeuert wird. Dadurch wird ein Photon mit hoher Energie geteilt in zwei Photonen mit niederer Energie als das Ursprungs Photon.

<sup>66</sup>Nichtlinearen optischen Kristalle haben die Eigenschaft, dass sie Lichtwellen von doppelter Frequenz erzeugen können bzw. die Eingangsfrequenz vervielfachen können.

Die nun entstanden zwei Photonen können auf ihrer Polarisation hin gemessen werden. Wenn das eine gemessen wurde, ist anschließend auch ohne zweite Messung automatisch der Polarisation des zweiten Photons festgelegt.

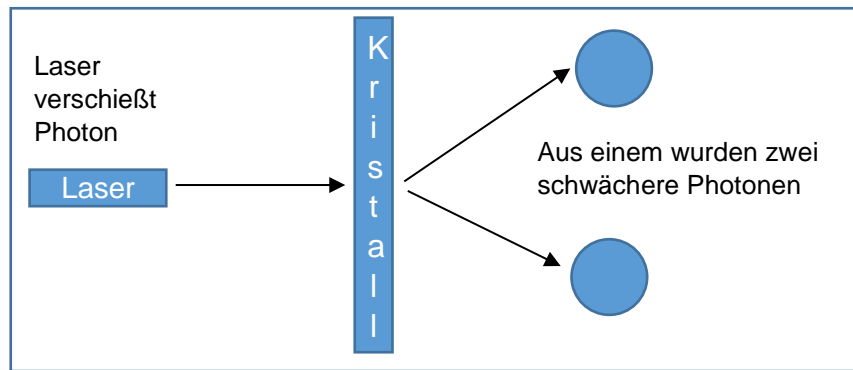
---

<sup>63</sup> Information Service GmbH - Quantenverschränkung

<sup>64</sup> Das No-Cloning-Theorem besagt, dass es nicht möglich ist, ein Quantenbit auf ein anders Quantenbit zu kopieren, ohne das ursprüngliche zu verändern. Somit ist ausgeschlossen ein Objekt komplett und richtig zu klonen. - Information Service GmbH - No-Cloning-Theorem

<sup>65</sup> Information Service GmbH - Quantenverschränkung

<sup>66</sup> LASER COMPONENTS - Laserstäbe und Kristalle



**Abbildung 16:** Entstehung verschränkter Systeme

### 4.3 Teleportation Versuchsaufbau

<sup>67</sup>Dieses Experiment wurde von <sup>68</sup>Anton Zeilinger und seinem Team 1997 durchgeführt. Wie bei jedem Transport von Informationen gibt es einen Sender und einen Empfänger. Der Sender ist in diesem Fall „Alice“ und der Empfänger „Bob“. Beide erhalten ein Photon (Photon 2; Photon 3). Beide Photonen sind miteinander verschränkt, sprich sie stehen senkrecht zueinander. Nun bekommt Alice ein weiteres Photon (Photon 1). Mit diesem Photon versucht Alice ihr Photon 2 zu beeinflussen.

<sup>69</sup>Im Labor wird dies mit halbdurchlässige Spiegel realisiert, auf dem die Photonen gleichzeitig auftreffen und sich überschneiden.

<sup>70</sup>Durch eine Messung der Polarisierung beider Photonen können als Ergebnisse 4 verschiedenen Zustände, die auch Bell-Zustände genannt werden, herauskommen. Diese Zustände sind wahrscheinlichkeitsbedingt und entstehen, bei der Verknüpfung von zwei Qubits.

Das Folgende Bild, zeigt alle möglichen Zustände. Jeder Zustand hat die Wahrscheinlichkeit von  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ . Das A steht für den Sender Alice und das B für den Empfänger Bob. Die Pfeile Symbolisiert die Polarisationsrichtung ob horizontal oder vertikal.

<sup>67</sup> Angerer, E., Kröpfel, J., Bartussek, V., Herper, J., & C. Möstl. - Quantenteleportation

<sup>68</sup> Anton Zeilinger, (g20.05.1945), ist ein Quantenphysiker und arbeitete an der Universität Wien

<sup>69</sup> Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY - Quanten-Teleportation im Detail

<sup>70</sup> Bronner, P. - Was sind die vier Bell-Zustände?

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow_A, \uparrow_B\rangle + |\leftrightarrow_A, \leftrightarrow_B\rangle) \quad (B1)$$

$$|\Phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow_A, \uparrow_B\rangle - |\leftrightarrow_A, \leftrightarrow_B\rangle) \quad (B2)$$

$$|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow_A, \leftrightarrow_B\rangle + |\leftrightarrow_A, \uparrow_B\rangle) \quad (B3)$$

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow_A, \leftrightarrow_B\rangle - |\leftrightarrow_A, \uparrow_B\rangle) \quad (B4)$$

**Abbildung 17:** Die vier Bell-Zustände 71

Bei den Zuständen B1 und B2 ist die Polarisation der Photonen gleich. Bei B3 und B4 ist die Polarisation der Photonen senkrecht zueinander.

<sup>72</sup>Da Photon 2 und 3 aber noch senkrecht zueinanderstehen, wird das Photon 3 von der Messung beeinflusst. Wenn bei der Messung, der Zustand B3 oder B4 herauskommt, dann ist das Photon 1 senkrecht zum Photon 2 polarisiert. Nur wenn dies eintritt, dann kann eine Teleportation stattfinden. Da zur gleichen Zeit das Photon 3 ebenfalls mit Photon 2 senkrecht polarisiert ist, müssen Photon 1 und Photon 3 dieselbe Polarisation besitzen. Hier fand nun die Teleportation statt. Der Polarisation Zustand von Photon 1 wurde an Photon 3 übertragen. Dies nennt man Verschränkungstausch. Da Bob sein Photon allerdings nicht messen kann, weiß er nichts von der erfolgreichen Teleportation. Alice muss ihm diese auf einem herkömmlichen Kommunikationsweg mitteilen, z.B. übers Telefon.

Durch die Messung von Alice sind Photon 1 und 2 nun miteinander verschränkt. Allerdings ist dadurch die Verschränkung von Photon 2 und 3 zerstört worden. Photon 3, hat nach der Messung die Eigenschaften von Photon 1 übernommen.

---

<sup>71</sup> Bronner P. (2008) - Verschränkung Kapitel C: Was sind die vier Bell-Zustände?

Quelle der Grafik:

<http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/quantumlab/Verschraenkung/Bell/Bell-Ungleichungen.jpg>

<sup>72</sup> Angerer, E., Kröpfel, J., Bartussek, V., Herper, J., & C. Möstl. - Quantenteleportation

Dieses Experiment wurde in Wien durchgeführt. Alice und Bob waren 630m voneinander entfernt. Die verschränkten Teilchen wurden per Glasfaser übertragen, da diese sehr gut, Photonen weiterleiten können. Es sind bereits Teleportationen über weitere Entfernungen gelungen, allerdings wurde diese mit Lasern realisiert. Da die verschränkten Teilchen in „sichtkontakt“ miteinander sein müssen, ist dieses Experiment mit Glasfaserkabeln ein erster Schritt in Richtung Quantennetzwerke, da es in Städten durch die vielen Häuser nicht sehr effektiv ist mit Lasern zu arbeiten.

Das folgende Bild zeigt den Versuchsaufbau der Wiener Universität.

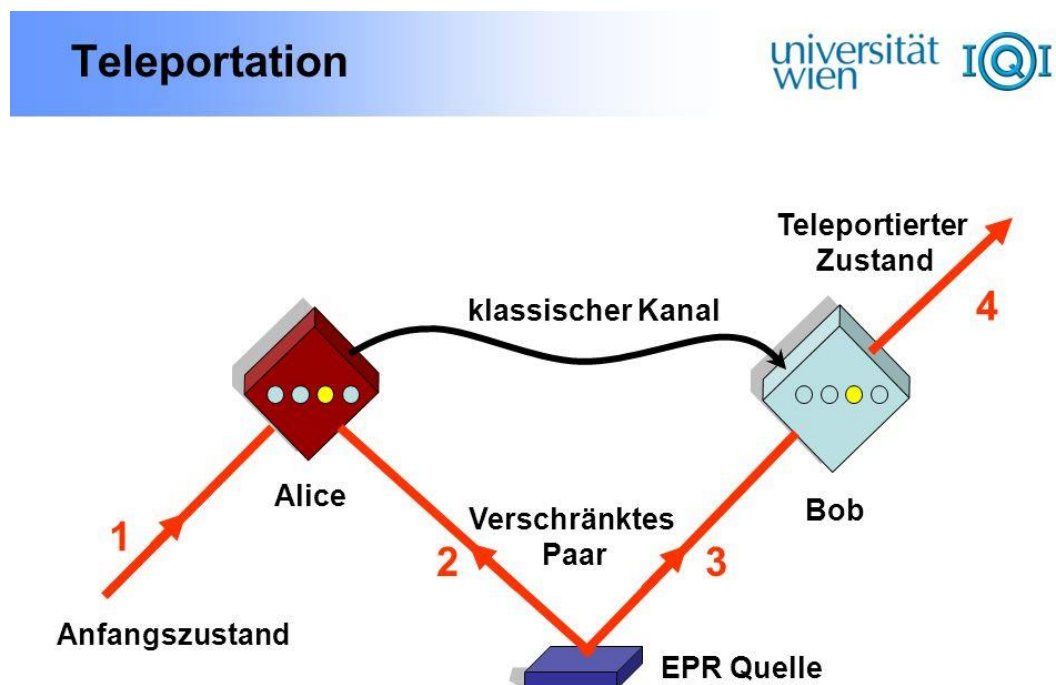


Abbildung 18: Teleportation Versuch Aufbau<sup>73</sup>

<sup>73</sup> Kofler J. (2011) – Quantencomputer und Quantenkryptographie – demnächst auch in Ihrem Laptop?

Quelle der Grafik:

[http://images.slideplayer.org/1/653847/slides/slide\\_43.jpg](http://images.slideplayer.org/1/653847/slides/slide_43.jpg)

## 4.4 Fortschritte bei der Teleportation

<sup>74</sup>Im Jahre 2009 schaffte Jian-Wei Pan und sein Team, von der Chinesischen Universität der Wissenschaften und Technik, einen Distanzrekord in der Teleportation. Sie bauten einen Laser auf einen Berg und richteten ihn auf ein Hausdach, in 16 Kilometer Entfernung, aus. Dieser Laser ersetzt das Glasfaserkabel im vorherigen Versuch.

Durch diese erfolgreiche Teleportation, sind die Forscher ihrem eigentlichen Ziel, Quantenteleportation zu einem Satelliten, einen großen Schritt nähergekommen. Wenn dies gelingt, dann wäre der erste Schritt, Richtung Quanteninternet, getan.

<sup>75</sup>Genau für diesen Zweck, hat China vergangenes Jahr, 2016, den ersten Quanten-Satelliten ins Weltall geschossen. Der Satellit hat den Namen „Micius“ und soll die nächsten zwei Jahre einige Test durchführen, um Quantenteleportation zu testen. Der Grund, weshalb versucht wird das Quanteninternet über Satelliten aufzubauen liegt daran, dass durch die atmosphärischen Störungen eine Quantenteleportation über längeren Distanzen mit Glasfaserkabeln auf der Erde nicht möglich ist.

<sup>76</sup>Der aktuelle Rekord bei der Quantenteleportation über Glasfaserkabel liegt bei 100 Kilometern. Dies gelang einem Team der National Institutes of Standards and Technology. Durch diese Strecke sind allerdings nur 1 Prozent aller Photonen durchgekommen. Nur aufgrund von neuen Detektoren, konnte man dieses sehr schwache Signal messen. Der Verlust liegt daran, dass die Glasfasern das Licht absorbieren, und somit kommen die meisten Photonen nicht weit.

---

<sup>74</sup> Spektrum Akademischer Verlag - Quantenwettlauf ins All

<sup>75</sup> SPIEGEL-Verlag Rudolf Augstein GmbH & Co. KG - China schickt Quanten-Satelliten ins All

<sup>76</sup> SPIEGEL-Verlag Rudolf Augstein GmbH & Co. KG - Forscher teleportieren Signale 100 Kilometer weit



## 4.5 Quantenrepeater

<sup>77</sup>Quantenrepeater haben wie Repeater in der digitalen Kommunikationstechnik die Aufgabe, ein Signal zu verstärken, damit das Signal weitere Strecken zurücklegen kann. Einem Wissenschaftlerteam der Universität Heidelberg, der University of Science and Technology of China und der TU Wien ist es als erstes gelungen, einen stabilen Quantenrepeater zu bauen. Das Hauptproblem bei einem Quantenrepeater liegt daran, dass man einen Quanten nicht Kopieren kann (No-Cloning-Prinzip). Somit kann man einen ankommenden Quanten nicht neu erzeugen und ihn somit verstärken. Um einen Quanten zu verstärken, schlug Hans J. Briegel<sup>78</sup> vor, dass der Kommunikationskanal in mehrere kleine Segmente unterteilt wird. In diesen Segmenten werden verschränkte Teilchen aufgebaut und mithilfe des Verschränkungsaustausches verbunden. Also handeln sich die Informationen vom Sender zum Empfänger von Repeater zu Repeater. Dies passiert jedes Mal mit einer Quantenteleportation und des anschließenden Verschränkungsaustausches.

<sup>79</sup>Folgende Schritte müssen gemacht werden damit dies funktioniert:

1. Benachbarte Repeater werden miteinander verschränkt.
2. Mithilfe des „Entanglement Swapping“ (Verschränkungsaustausches) werden größerer Distanzen miteinander verschränkt
3. Mit der Verschränkungsdestillation werden aus vielen schwach Verschränkten Teilchen wenige, dafür stark verschränkte Teilchen

Da bei jedem Swapping die Stärke der verschränkten Teilchen abnimmt, müssen 2 und 3 immer abwechselnd gemacht werden.

Im folgenden Bild wird dies dargestellt. A steht für Alice als Sender und B für Bob als Empfänger. Das R steht für Repeater. Die Balken, die immer 3 Kreise miteinander verbinden, stellt die Verschränkung und den Verschränkungsaustausch da und soll den oben genannten 2. Schritt darstellen. Da im 3. Schritt die schwächeren Verschränkungen

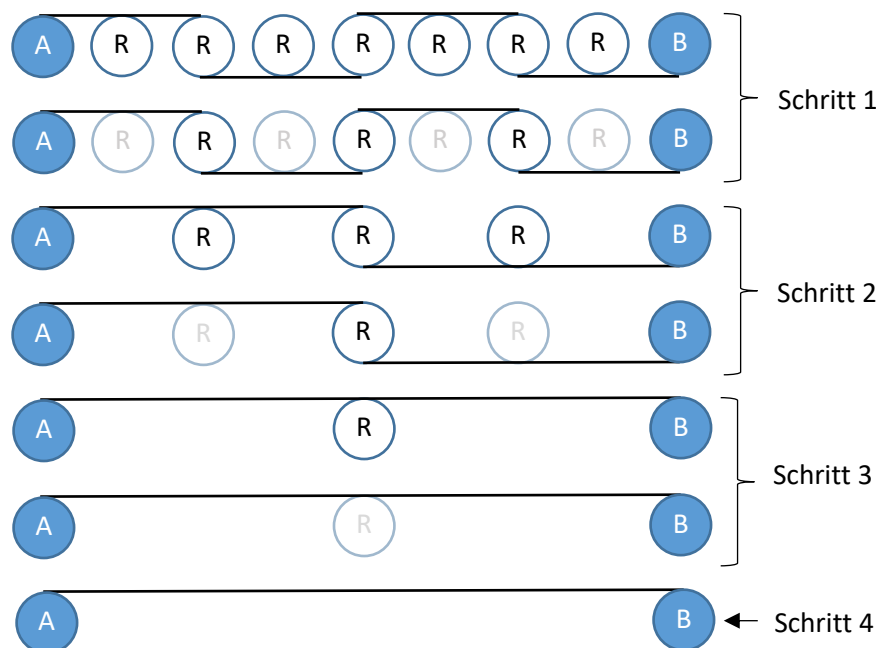
---

<sup>77</sup> Pan, J.-W. - Neuer Fortschritt in der Quantenkommunikation: Physiker realisieren einen stabilen „Quanten-Repeater“

<sup>78</sup> Hans Jürgen Briegel, geboren 09.08.1962, Physiker und Mitbegründer der Quantenrepeater

<sup>79</sup> Diehm, R. - Quantenrepeater auf der Basis atomarer Ensemble

aufgelöst werden wurden die schwachen durchsichtiger im Schaubild dargestellt und diese sind beim nächsten durchlauf komplett verschwunden, damit nur noch sehr starke Verschränkungen existieren. Schritt 2 und 3 werden so oft wiederholt, bis nur noch Alice und Bob miteinander verschränkt sind, mit einer extrem starken Verschränkung.



**Abbildung 19:** Quantenrepeater - Entanglement Swapping

## 4.6 Quantenkryptografie

Wenn man mit sehr wichtigen und sensiblen Daten arbeitet, dann möchte man auch, dass diese verschlüsselt versendet werden, so dass kein dritter diese mitlesen kann. Allerdings gibt es keine Verschlüsselung die zu 100% sicher ist, denn selbst die kompliziertesten Verschlüsselungen lassen sich mit entsprechender Rechenleistung knacken. 1984 entwickelten Charles Bennett<sup>80</sup> und Gilles Brassard<sup>81</sup> das BB84-Protokoll. Es erzeugt einen Schlüssel.

<sup>80</sup> Charles Henry Bennett, geboren 1943, ist ein Physiker und Informatiker. Er gilt als Mitentdecker der Quantenteleportation

<sup>81</sup> Gilles Brassard, geboren 1955, ist ein Informatiker und Physiker

<sup>82</sup>Angenommen wir arbeiten mit Photonen, dann steht die vertikale Polarisation für ein 0 Bit und eine horizontale Polarisation für ein 1 Bit. Der Empfänger misst diese Photonen mithilfe einer horizontalen/vertikalen Basis. Damit unterscheidet er zwischen beiden Zuständen. Da eine Basis allerdings nicht ausreicht um 100% Sicherheit zu garantieren, benutzt man zwei Basen.

<sup>83</sup>Beispielhafte Funktion des Protokolls:

Angenommen wir haben wieder Alice als Sender und Bob als Empfänger. Alice kodiert ihre Photonen mit dem Schlüssel 0 oder 1. Sie benutzt dafür ihre zwei Basen H/V und  $45^\circ/-45^\circ$ . Bsp. kann H und  $45^\circ = 0$  sein und V und  $-45^\circ = 1$  kodiert werden. Der Empfänger Bob muss die ankommenden Photonen entsprechend der beiden Basen zuordnen und messen. Wenn Bob sich für die falsche Basis entscheidet, dann fallen diese beim Schlüssel weg (unten im Bild die „–“, beim Schlüssel). Wenn er jedoch die gleiche Basis wie Alice nimmt, dann ist die Polarisation gleich der von Alice. Somit können diese Werte nun als Schlüssel verwendet werden.

Um festzustellen, welche Photonen mit der gleichen Basis gemessen wurden, müssen Alice und Bob auf herkömmlichen Kommunikationsweg sich verständigen und jede Basiswahl miteinander vergleichen. Da die Basis alleine nicht ausreicht um zu erfahren welche Bit-Wert kodiert wurde, können dritte nichts mit den Informationen aus den Basisgleich anfangen. Selbst wenn ein Lauscher ein Photon abfängt, kann er nichts damit anfangen. Die Messung eines dritten stört unweigerlich das System, da in der Quantenmechanik nichts beobachtet werden kann, ohne dass dies gestört wird.

<sup>84</sup>Wenn ein Lauscher die Polarisation messen möchte von einem Photon, muss er sich zuerst für eine Basis entscheiden. Da er nicht weiß, welche die richtige ist, misst er statistisch gesehen bei der Hälfte Messung das falsche und erhält somit ein komplett zufälliges Ergebnis. Deshalb hat der Dritte keine Ahnung, über was gerade kommuniziert wird. Durch die Messung kann er sogar die Polarisation des Photons ändern und hinterlässt somit große Spuren im System.

---

<sup>82</sup> Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. - Quantenkryptografie – ein Schlüssel im Licht

<sup>83</sup> Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. - Schematische Funktionsweise des BB84-Protokolls

<sup>84</sup> Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. - Quantenkryptografie – ein Schlüssel im Licht

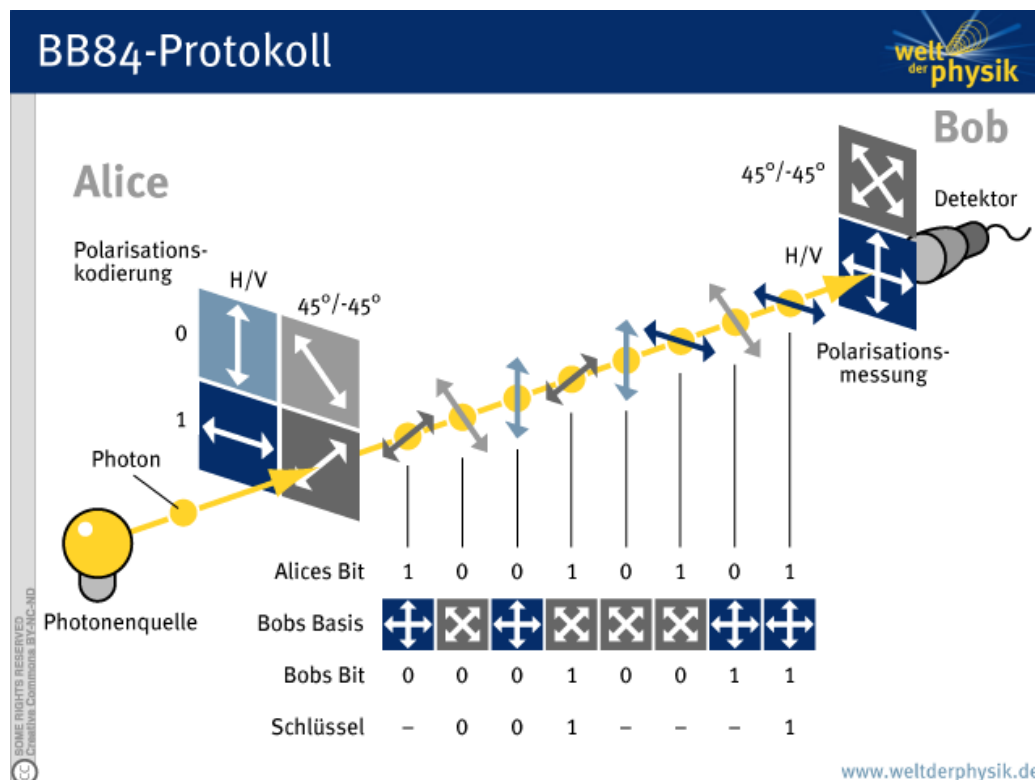


Abbildung 20: BB84-Protokoll 85

## 4.7 Vorteile der Quantenteleportation

<sup>86</sup>Der größte Vorteil, die Übertragungsgeschwindigkeit, ist direkt ersichtlich. Die Informationen werden quasi im selben Moment empfangen wie sie gesendet werden. Dies ist mit keiner anderen Technologie heutzutage möglich. Somit entfällt sehr viel Zeit, die man mit warten verbringen muss. <sup>87</sup>Des Weiteren kann mit der Quantenteleportation ein abhörsicheres Netzwerk aufgebaut werden mit Hilfe der Quantenkryptografie. Selbst ohne diese Kryptografie Methoden, wird ein abhören der Informationen im Netz sofort gemerkt, da das Messen von dem Empfänger Photon nur einmal geht und somit ein Mitlesen sofort auffallen würde. Somit werden besonders das Militär und große Firmen besonderes Interesse an so einem Sichern Netzwerk haben.

<sup>85</sup> Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (2017) – Schematische Funktionsweise des BB84-Protokolls  
 Quelle der Grafik:  
[http://www.weltderphysik.de/uploads/tx\\_wdpmedia/20081118\\_BB84Protokoll\\_DGuenther.png](http://www.weltderphysik.de/uploads/tx_wdpmedia/20081118_BB84Protokoll_DGuenther.png)

<sup>86</sup> SPIEGEL-Verlag Rudolf Augstein GmbH & Co. KG - China schickt Quanten-Satelliten ins All

<sup>87</sup> SPIEGEL-Verlag Rudolf Augstein GmbH & Co. KG - Forscher teleportieren Signale 100 Kilometer weit

## 5 Quantencomputer

<sup>88</sup>Herkömmliche Computer arbeiten Ihre Aufgaben Schritt für Schritt ab. Sie arbeiten mit binären Ziffern also 1 und 0. Doch seitdem die Quantenforschung immer weiter voranschreitet, hatte bereits Richard Feynman die Idee, einen Quantencomputer zu bauen, der mit Qubits arbeiten. Der große Vorteil dabei wäre es, das Qubits 0 und 1 gleichzeitig sind und somit könnten sie schneller arbeiten als herkömmliche Computersysteme da diese Operationen parallel abarbeiten könnten. <sup>89</sup>Als Beispiel können zwei Qubits vier Zustände annehmen  $(0 | 0)$  ;  $(1 | 1)$  ;  $(0 | 1)$  ;  $(1 | 0)$  und dies nicht wie normale Bits nacheinander, sondern gleichzeitig.

<sup>90</sup>Um einen Quantencomputer zu bauen, benötigt man eine Rechen- und Speichereinheit. Die Qubits werden aus Ionen hergestellt. Damit diese nicht entweichen können, werden die Ionen Positiv geladen (d.h. die Elektronen werden ihnen genommen) in einem elektrischen Feld gefangen.

Qubits:

- Qubit 0 = nicht angeregtes Ion
- Qubit 1 = angeregtes Ion (Dem Teilchen wurde Energie hinzugeführt)

Um die Qubits zu verändern, werden Laser benutzen. Damit lassen sich die Ionen anregen, nicht anregen oder in einen Zustand dazwischen, der Superposition, bringen. Da ein Qubit alleine natürlich nicht ausreicht, werden viele Qubits in sog. Quantenregistern benötigt.

Um die Zustände der Qubits zu beschreiben benutzen die Physiker genauso wie Informatiker logische Operationen. Diese Quantengatter können die Qubits verändern, wenn sie auf Ihnen angewandt werden. Die einfachste Operation aus der Informatik ist NOT. Dabei wird der Zustand des Bits einfach umgekehrt. Die Quantengatter sind allerdings etwas komplexer als die aus der Informatik.

---

<sup>88</sup> Spektrum Akademischer Verlag - Quantenwettlauf ins All

<sup>89</sup> Lindinger, M. - Wie der PC zur lahmen Ente wird

<sup>90</sup> Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. - Wie funktioniert ein Quantencomputer?

<sup>91</sup>Als ein Beispiel für eine logische Funktion soll das Pauli-Z-Gatter dienen. Mit Hilfe dieses Gatters lässt sich der Eingang an der Z-Achse spiegeln. Sie ist mit der Funktion  $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$  beschrieben.

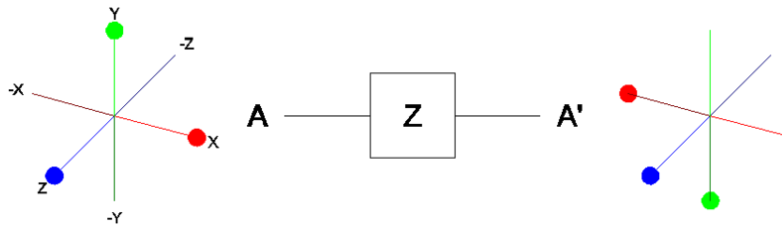


Abbildung 21: Darstellung des Pauli-Z-Gatters

<sup>92</sup>

Um mit diesen Quantengattern rechnen zu können muss zuerst. Anfangszustand des Qubits muss festgelegt werden. Im Labor wird dies mit einem Laser gemacht, der auf die Ionen schießt. Abhängig von der Länge der Bestrahlung ist das Ion anschließend angeregt oder nicht angeregt.

Zurzeit steckt diese Technik noch in den Kinderschuhen. Die Prototypen die bisher existieren sind nur rudimentär. Sie besitzen wenige Qubits und sind noch recht groß. Die größte Schwachstelle ist es, dass herkömmliche Fehlerkorrekturen bei Quanten Rechnern nicht greifen. Somit ist es das momentane Ziel die Fehler pro Operation zu reduzieren. Aber in nicht weit entfernter Zukunft, werden diese Rechner eine wichtige Stellung bekommen. Der erste Computer von Konrad Zuse war ebenfalls weit von dem entfernt, was heutige Rechner können.

<sup>91</sup> Information Service GmbH - Liste der Quantengatter

<sup>92</sup> Wikimedia Foundation Inc. (2015) - Liste der Quantengatter

Quelle der Grafik:

[https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_Quantengatter#/media/File:QuantengatterZ.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Quantengatter#/media/File:QuantengatterZ.png)

## 6 Fazit

In diesem Kapitel wird Rückblickend auf die vorhergegangenen Kapitel geschaut (6.1 Zusammenfassung) und nochmal zusammenfassend geschildert was in den vorherigen Kapiteln erklärt wurde. Daraufhin folgt der Ausblick (6.2 Ausblick), der einen Überblick über die zukünftigen Entwicklungen und Ideen hinter der Quantenteleportation zeigen soll. Abschließend wird im Schlusswort (6.3 Schlusswort) die Frage geklärt, ob die Teleportation von Daten in näherer Zukunft Alltag werden kann und die herkömmlichen Kommunikationstechniken ablösen wird.

### 6.1 Zusammenfassung

Einleitend zu dem Thema: „Daten Teleportation mit Hilfe der Quantenphysik – ein Einblick in aktuelle Entwicklungen“ wurde erstmal erklärt, was Datenverkehr (2.1 Datenverkehr) ist. Cisco führte zum Thema Datenverkehr eine Studie durch die zeigt, dass das Volumen jedes Jahr enorm ansteigt. Die Service Provider müssen dadurch eine immer bessere Infrastruktur bereitstellen und die Sicherheitsmaßnahmen erhöhen. Durch die immer größer werdende Anzahl von Daten, muss auch die Bandbreite immer größer werden. Wie die Übertragungsgeschwindigkeit (2.2 Übertragungsgeschwindigkeit) zustande kommt wurde im nächsten Kapitel erklärt. Diese wird meistens in Bandbreite angegeben, also wieviel Daten pro Übertragung transportiert werden können. Abschließend zum 2. Kapitel wurden noch die 3 herkömmlichsten Datenübertragungsarten (2.3 Herkömmliche Datenübertragungsarten) vorgestellt. Dies waren elektrische Signale (2.3.1 Elektrische Signale), optische Signale (2.3.2 Optische Signale) und Elektromagnetischen Wellen (2.3.3 Elektromagnetischen Wellen). Im Kapitel 3 (3 Quantenphysik) wurden die Grundbegriffe und generell die Quantenphysik vorgestellt und erklärt. Im Unterkapitel 3.1 wurde das Doppelspalt-Experiment (3.1 Das Doppelspalt-Experiment) vorgestellt. Dieses zeigte, dass die Quantenphysik sich sehr von der klassischen Physik unterscheidet. Es stellt die Wissenschaft vor die Frage: Was ist Materie? Sind es Teilchen oder Wellen? Anschließend wurde im Kapitel 3.2 erklärt, was Quanten (3.2 Quanten) sind. Dies sind die kleinsten uns bekannten Objekte. Ein besonderes Elementarteilchen dabei ist das Photon (3.3.2 Photonen), da es keine Masse und keine Ladung besitzt. Dadurch hat es eine unendliche Reichweite. Ein weiteres wichtiges ist das Elektron (3.3.1 Elektronen). Diese gelten als sehr stabil, da bisher noch

niemand ein Elektron zerfallen gesehen hat. Des Weiteren wurde das Qubit (3.4 Quantenbit) vorgestellt. Ein Qubit entspricht genau einem Teilchen und kann zum Unterschied zu einem normalen Bit mehrerer Zustände in einer Superposition gleichzeitig besitzen. Im dem darauffolgenden Kapitel 4 (4 Quantenteleportation), wurde die Quantenteleportation vorgestellt. Als Einstieg in das Thema wurde im Kapitel 4.1 die Quantenverschränkung (4.1 Quantenverschränkung) erklärt. Dieses Phänomen lässt zwei Elementarteilchen miteinander verbinden und ihre Eigenschaften identisch werden. Dies geschieht ohne dass eine erkennbare Verbindung existiert. Sie können Millionen von km voneinander entfernt sein und trotzdem ändern sich die Eigenschaften des einen Teilchens im selben Moment wo diese bei dem anderen geändert werden. Wie solche Verschränkten Teilchen entstehen, wurde im darauffolgenden Kapitel 4.2 (4.2 Entstehung verschränkter Systeme) gezeigt. Anschließend wurde der Versuchsaufbau von der Quantenteleportation mithilfe eines Glasfasernetzes von Anton Zeilinger vorgestellt (4.3 Teleportation Versuchsaufbau). Dieser Versuch zeigte, dass es möglich ist sog. Quantennetzwerke aufzubauen und somit die Quantenteleportation in naher Zukunft in Städten genutzt werden kann. Das Hauptproblem bei der Quantenteleportation ist, dass die beiden Teilchen Sichtkontakt zueinander haben müssen. Bisher war dies mit Lasern möglich, doch der Versuch von Anton Zeilinger zeigte, dass es auch mit Glasfasergabeln gelingt. Doch mit Glasfaserkabeln gibt es ein Problem mit der Länge, denn umso länger die Kabel sind, umso mehr Verlust der Daten gibt es. Es ist ein richtiger Wettlauf entstanden und fast monatlich gibt es neue Entfernungsrekorde. Diese Fortschritte wurden im Kapitel 4.4 (4.4 Fortschritte bei der Teleportation) angesprochen. Des Weiteren wurde im Kapitel 4.4 (4.5 Quantenrepeater) der Quantenrepeater vorgestellt. Mit dessen Hilfe ist es möglich, die Länge der Glasfaserkabel erheblich zu erhöhen. Als nächstes wurde in Kapitel 4.6 (4.6 Quantenkryptografie) die Quantenkryptografie und das Verschlüsselungsprotokoll BB84-Protokolls vorgestellt. Abschließend zum Thema der Quantenteleportation werden die Vorteile der Quantenteleportation im Kapitel 4.7 (4.7 Vorteile der Quantenteleportation) nochmals zusammengefasst.

Im letzten Kapitel 5 (5 Quantencomputer) wurden Quantencomputer vorgestellt. Sie arbeiten mit Qubits und können somit nicht nur Aufgaben parallel, sondern gleichzeitig abarbeiten. Diese Technik steckt allerdings noch in den Kinderschuhen und es sind gerade mal 14 Qubits realisiert in so einem Computer.



## 6.2 Ausblick

Die Quantenteleportation wirft viele Fragen auf. Z.B. <sup>93</sup>wie können verschränkte Teilchen das Ergebnis der Messung von seinem weit entfernten Partner kennen und diesen Zustand ebenfalls annehmen? Vielleicht existiert ein Kommunikationskanal, der noch nicht entdeckt wurde. Eine weitere unbeantwortete Frage ist, ob die Zeit eine feste Größe ist, wie es in der Relativitätstheorie angenommen wird, oder ist sie nicht genau bestimmbar?

Genauso ist die Frage, was ist überhaupt „Raum“ also Bsp. die Entfernung zwischen zwei verschränkten Photonen, noch nicht geklärt. Es könnte ein Gebilde sein was uns vortäuscht das Objekte weit voneinander entfernt sind, aber in Wirklichkeit sind die beiden Photonen noch fest miteinander verbunden.

<sup>94</sup>Die Menge an Daten wächst beständig und verdoppelt sich so gut wie jedes Jahr. Bis 2020 eine gesamte Menge von 40 Zettabyte (21 Nullen nach der Eins) erreichen. Dies wäre 50mal so viel wie 2010. Somit werden die Anforderungen an unsere Kommunikationsnetzwerke immer höher.

Ein vollständig funktionsfähiges Quantennetzwerk würde sehr vieles verändern. Zum einen gäbe es keine Wartezeiten bei der Übertragung von Daten mehr. Das Glasfaserkabel muss nicht besonders dick sein, da über dieses keine Informationen gesendet werden, sondern lediglich Photonen versendet werden, bzw. für den benötigten Sichtkontakt von zwei verschränkten Teilchen vorhanden ist. Ein weiterer Vorteil wäre die vollständige Sicherheit dieses Kommunikationskanals, da Quantennetzwerke mithilfe von Quantenkryptografie die Informationen so verschlüsseln lassen, dass diese den bisher sichersten Kommunikationsweg darstellt. Es wird wohl noch einige Jahre dauern bis die ersten Quantennetzwerke für die Öffentlichkeit zugänglich werden, aber die Fortschritte in diesem Gebiet sind sehr rasant und erinnern an die damalige Entwicklung des World Wide Webs.

Allerdings haben Quantennetzwerke im Moment das Problem der Reichweite, da durch die Länge des Leitungsweges die Photonen nach einer gewissen Zeit absorbiert werden. Deswegen werden immer neue Techniken entwickelt um die Entfernungen zu verlängern. Es ist ein regelrechter Wettlauf geworden, wer am weitesten teleportieren

---

<sup>93</sup> Spektrum Akademischer Verlag - Quantenwettlauf ins All

<sup>94</sup> Jüngling, T. - Datenvolumen verdoppelt sich alle zwei Jahr

kann. Es werden regelmäßig neue Rekorde aufgestellt und es beliebt spannend wo dies sich in den nächsten Jahren hin entwickelt. Zwar können mit Quantenrepeater die Länge erheblich erhöht werden, allerdings ist diese Lösung nicht so elegant und „einfach“ wie die Teleportation über eine Leitung ohne Unterbrechungen.

<sup>95</sup>Eine Variante ist es große Entfernungen per Satelliten zu verbinden und nur dort, wo der Satelliten Empfang nicht 100% gewährleistet werden kann, z.B. in Städten aufgrund der hohen Gebäude, ein Glasfasernetz aufzubauen. Einige Experimente mit einem Flugzeug, das Qubits an eine Bodenstation sendete, zeigte, dass dies möglich ist. Zwar beträgt die aktuelle Übertragungsrate nur fünf Qubits pro Sekunde, aber dies reichte für einige Experimente aus. Zurzeit wird versucht, die Systeme so zu verkleinern, dass sie in naher Zukunft in unsere Mobilien Geräte passen. Somit hätten wir einen neuen Abhörsicheren Kommunikationsweg, der unsere bisherigen ablöst.

<sup>96</sup>Ein weiterer Meilenstein in der Computertechnik wären die Quantencomputer. Zurzeit besitzen diese lediglich 14 Quantenbits und haben somit eine noch recht überschaubare Rechenleistung. Rainer Blatt von der Universität Innsbruck ist zurzeit einer der führenden Quantencomputer Wissenschaftlern. Er hat die Vision, dass die Rechenleistung der Quantencomputer in den nächsten fünf bis zehn Jahren so anwachsen, dass diese genauso genutzt werden können wie heutige Großrechner. Er sagte:

*„Dann schicken Sie Ihre Programme dahin und bekommen das Ergebnis wieder.“*

Aber bis es einen Quantencomputer für Zuhause gibt, wird es wohl noch einige Zeit dauern, da die aktuellen noch sehr groß und teuer sind. Außerdem sind die bisherigen nur für sehr spezielle Aufgaben zu gebrauchen wie z.B. komplexe Berechnungen.

---

<sup>95</sup> Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. - Quantenkryptografie – ein Schlüssel im Licht

<sup>96</sup> Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. - Wie funktioniert ein Quantencomputer?

### 6.3 Schlusswort

Die Wissenschaft, hinter der Teleportation von Daten ist noch sehr jung. Es werden immer neue Entfernungsrekorde aufgestellt und eine Realisierung dieser Technik scheint immer realer zu werden. Trotzdem wird es wohl noch einige Jahre brauchen, bis die ersten Quantencomputer ausgeliefert werden und noch länger bis die ersten Privathäuser solche Quantencomputer zu kaufen bekommen. Die neuen Quantennetze werden wahrscheinlich erst für das Militär und für große Unternehmen zu Verfügung stehen.

Das Ganze kommt einem sehr bekannt vor. Die ersten Computer und das Internet, waren damals ebenfalls nur für das Militär und für große Unternehmen bestimmt. Erst einige Jahre später konnten sich auch private Leute sich diese Technik leisten. So ähnlich wird es wohl auch mit den Quantennetzen und den Quantenrechnern sein. Man könnte dies als Revolution des Internets ansehen oder als Internet 2.0. Eine sofortige Transportation von Daten ohne Wartezeiten. Das Datenvolumen Problem von heute kann vergessen werden, da keine Daten mehr herkömmlich transportiert werden müssen. Des Weiteren wäre dies die erste komplett abhörsichere Übertragungsmethode.

Somit könnte die Quantenteleportation, in einigen Jahren, unsere Kommunikation komplett Revolutionieren.

## Literaturverzeichnis

- Aigner, F., & Grafenhofer, D. (30. 01 2017). *Quanten und Stehlampen*. Von naklar.at: <http://www.naklar.at/content/features/entanglement/> abgerufen
- Angerer, E., Kröpfel, J., Bartussek, V., Herper, J., & C. Möstl. (01. 02 2017). *Quantenteleportation*. Von uni-graz.at: [http://physik.uni-graz.at/~cbl/QM/contents/Projekte\\_2004/p1/G3\\_Quantenteleportation.pdf](http://physik.uni-graz.at/~cbl/QM/contents/Projekte_2004/p1/G3_Quantenteleportation.pdf) abgerufen
- Artelt, D. (19. 01 2017). *Cloud Computing einfach erklärt*. Von aixvox: <https://www.aixvox.com/cloud-computing-einfach-erklart/> abgerufen
- Bäker, M. (31. 01 2017). *Quantenmechanik verstehen III – Verschränkung*. Von ScienceBlogs: <http://scienceblogs.de/hier-wohnen-drachen/2013/01/27/quantenmechanik-verstehen-iii-verschränkung/> abgerufen
- Bäker, M. (31. 01 2017). *Quantenmechanik verstehen III – Verschränkung*. Von ScienceBlogs: <http://scienceblogs.de/hier-wohnen-drachen/2013/01/27/quantenmechanik-verstehen-iii-verschränkung/3/> abgerufen
- Bäker, M. (28. 01 2017). *Was ist ein Photon?* Von ScienceBlogs: <http://scienceblogs.de/hier-wohnen-drachen/2015/04/06/was-ist-ein-photon/> abgerufen
- Bibliographisches Institut GmbH. (20. 02 2017). *Elementarteilchen*. Von Lern Helfer: <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/elementarteilchen> abgerufen
- Bibliographisches Institut GmbH. (24. 01 2017). *Informationsübertragung mit hertzschen Wellen*. Von Lern Helfer : <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/informationsuebertragung-mit-hertzschen-wellen> abgerufen
- Bibliographisches Institut GmbH. (28. 01 2017). *Photonen*. Von Lern Helfer: <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/photonen> abgerufen
- Bronner, P. (02. 02 2017). *Was sind die vier Bell-Zustände?* Von QuantumLab: <http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/quantumlab/index.html?/quantumlab/Verschraenkung/Bell/> abgerufen
- Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (17. 02 2017). *Quantenkryptografie – ein Schlüssel im Licht*. Von Welt der Physik: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/quanten-technik/quantenkryptografie/> abgerufen
- Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (17. 02 2017). *Schematische Funktionsweise des BB84-Protokolls*. Von Welt der Physik: [http://www.weltderphysik.de/media/?tx\\_wdpmedia\\_pi2%5Bimage%5D=850&tx\\_wdpmedia\\_pi2%5Baction%5D=image&tx\\_wdpmedia\\_pi2%5Bcontroller%5D=Gallery&cHash=5b9f087b463aa582c435a44ca3425916](http://www.weltderphysik.de/media/?tx_wdpmedia_pi2%5Bimage%5D=850&tx_wdpmedia_pi2%5Baction%5D=image&tx_wdpmedia_pi2%5Bcontroller%5D=Gallery&cHash=5b9f087b463aa582c435a44ca3425916) abgerufen
- Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (14. 02 2017). *Wie funktioniert ein Quantencomputer?* Von welt der physik: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/quanten-technik/einfuehrung-quantencomputer/> abgerufen

- Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY. (02. 02 2017). *Quanten-Teleportation im Detail*. Von DESYs KworkQuark: <http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/kworkquark/de/kennenlernen/artikel.quantenphysik-4/11/2/index.html> abgerufen
- Diehm, R. (17. 02 2017). *Quantenrepeater auf der Basis atomarer Ensemble*. Von Universität Kaiserslautern: <https://www.physik.uni-kl.de/agfleischhauer/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=teaching:handout-diehm.pdf> abgerufen
- Embacher, F. (13. 02 2017). *Über die Welt der Quantentheorie*. Von SlidePlayer: <http://slideplayer.org/slide/887314/> abgerufen
- Germer, H., & Wefers, N. (1985). *Messelektronik*. Heidelberg: Hüthig.
- Golem Media GmbH. (07. 02 2017). *Mobile Datennutzung legt um das Zehnfache zu*. Von golem.de: <https://www.golem.de/news/deutschland-mobile-datennutzung-legt-um-das-zehnfache-zu-1402-104399.html> abgerufen
- Hans, M. (24. 01 2017). *Kommunikation mit Hertzschen (elektromagnetischen) Wellen*. Von Mirko Hans: [http://www.mirko-hans.de/profil/kommunikation/dateien/UE06\\_hertzsche\\_Wellen/Kommunikation\\_mit\\_Hertzschen\\_Wellen\\_Lsg.pdf](http://www.mirko-hans.de/profil/kommunikation/dateien/UE06_hertzsche_Wellen/Kommunikation_mit_Hertzschen_Wellen_Lsg.pdf) abgerufen
- Helmich, U. (01. 25 2017). *Frequenzmodulation*. Von Helmichs Biologie-Lexikon: <http://www.u-helmich.de/bio/lexikon/F/frequenzmodulation.html> abgerufen
- Höche, P. (07. 02 2017). *Bandbreite vs. Datenrate*. Hochschule Harz: Fachbereich Medieninformatik. Von <http://myweb3.hs-harz.de/mkreyssig/af/pdf/BandbreiteDatenrate.pdf> abgerufen
- Information Service GmbH. (14. 02 2017). *Liste der Quantengatter*. Von Chemie.de: [http://www.chemie.de/lexikon/Liste\\_der\\_Quantengatter.html](http://www.chemie.de/lexikon/Liste_der_Quantengatter.html) abgerufen
- Information Service GmbH. (30. 01 2017). *No-Cloning-Theorem*. Von Chemie.de: <http://www.chemie.de/lexikon/No-Cloning-Theorem.html> abgerufen
- Information Service GmbH. (31. 01 2017). *Quantenverschränkung*. Von Chemie.de: <http://www.chemie.de/lexikon/Quantenverschr%C3%A4nkung.html> abgerufen
- Jüngling, T. (19. 01 2017). *Datenvolumen verdoppelt sich alle zwei Jahre*. Von Welt: <https://www.welt.de/wirtschaft/webwelt/article118099520/Datenvolumen-verdoppelt-sich-alle-zwei-Jahre.html> abgerufen
- Keil, D. (26. 01 2017). *Photoeffekt*. Von Abi Physik: <http://www.abi-physik.de/buch/quantenmechanik/photoeffekt/> abgerufen
- Kofler, J. (13. 02 2017). *Den Quanten auf der Spur - von der Grundlagenforschung zum Quantencomputer*. Von Universität Wien - Fakultät für Physik: [http://www2.mpg.de/~jkofler/Files/Talks/Kofler%20\(2011\)%20-%20Den%20Quanten%20auf%20der%20Spur%20-%20von%20der%20Grundlagenforschung%20zum%20Quantencomputer.pdf](http://www2.mpg.de/~jkofler/Files/Talks/Kofler%20(2011)%20-%20Den%20Quanten%20auf%20der%20Spur%20-%20von%20der%20Grundlagenforschung%20zum%20Quantencomputer.pdf) abgerufen

- Konradin Medien GmbH. (01. 02 2017). *Elektron*. Von Wissen.de:  
<http://www.wissen.de/lexikon/elektron-physik> abgerufen
- LASER COMPONENTS . (01. 31 2017). *Laserstäbe und Kristalle*. Von Laser Components:  
<http://www.lasercomponents.com/de/produkt/nichtlineare-kristalle/> abgerufen
- Lindinger, M. (14. 02 2017). *Wie der PC zur lahmen Ente wird*. Von FAZ.NET:  
<http://www.faz.net/aktuell/wissen/physik-mehr/quantencomputer-von-ibm-arbeitet-mit-quantenbits-14275919.html> abgerufen
- Lipinski, K. (07. 02 2017). *Daten*. Von IT Wissen:  
<http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Daten-data.html> abgerufen
- Lück, B., & Donner, A. (07. 02 2017). *Datenverkehr wächst bis 2018 auf das Dreifache*. Von IP Insider: <http://www.ip-insider.de/datenverkehr-waechst-bis-2018-auf-das-dreifache-a-449958/> abgerufen
- Meßinger-Koppelt, J. (25. 01 2017). *Quantenphysik*. Von Leifi Physik:  
<http://www.leifiphysik.de/quantenphysik> abgerufen
- Mietke, D. (23. 01 2017). *Elektrische Signale*. Von Informations- und Kommunikationstechnik:  
<http://elektroniktutor.de/signalkunde/signdef.html> abgerufen
- Mundzeck, T. (01. 19 2017). *Forschern gelingt Rekord in Quantenteleportation*. Von Welt:  
<https://www.welt.de/wissenschaft/article146726224/Forschern-gelingt-Rekord-in-Quantenteleportation.html> abgerufen
- NETHINKS GmbH. (19. 01 2017). *Begriffe aus der Netzwerktechnik: Kupfer oder Glasfaser – welches Kabel hat die Nase vorn?* Von Nethinks:  
<https://www.nethinks.com/blog/standortvernetzung/begriffe-aus-der-netzwerktechnik-kupfer-oder-glasfaser-welches-kabel-hat-die-nase-vorn/> abgerufen
- Pan, J.-W. (17. 02 2017). *Neuer Fortschritt in der Quantenkommunikation: Physiker realisieren einen stabilen „Quanten-Repeater“*. Von Universität Heidelberg: <https://www.uni-heidelberg.de/presse/news08/pm280828-1qua.html> abgerufen
- Rudolph, D. (30. 01 2017). *Werner Heisenberg Unschärferelation*. Von frustfrei-lernen.de:  
<http://www.frustfrei-lernen.de/quantenphysik/werner-heisenberg-unschaerferelation.html> abgerufen
- Schnabel, P. (23. 01 2017). *Datenübertragung*. Von Elektronik Kompendium:  
<http://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/0212091.htm> abgerufen
- Schnabel, P. (23. 01 2017). *Optische Übertragungssysteme*. Von Elektronik Kompendium:  
<http://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/1307311.htm> abgerufen
- Schnabel, P. (01. 02 2017). *Quantenphysik*. Von Elektronik-Kompendium:  
<http://www.elektronik-kompendium.de/sites/grd/1209031.htm> abgerufen
- Schnabel, P. (06. 02 2017). *Übertragungsgeschwindigkeit und Datenrate*. Von Elektronik-Kompendium: <http://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/0212095.htm> abgerufen
- Schulz, J. (20. 02 2017). *Das Thomsonsche Atommodell*. Von Joachims Quantenwelt:  
<http://www.quantenwelt.de/atomphysik/modelle/thomson.html> abgerufen

- Spektrum Akademischer Verlag. (01. 02 2017). *Das rätselhafte Elektron*. Von Spektrum.de:  
<http://www.spektrum.de/kolumne/das-raetselhafte-elektron/1198794> abgerufen
- Spektrum Akademischer Verlag. (30. 01 2017). *Quanten-Teleportation*. Von Spektrum.de:  
<http://www.spektrum.de/magazin/quanten-teleportation/826507> abgerufen
- Spektrum Akademischer Verlag. (06. 02 2017). *Quantenwettlauf ins All*. Von Spektrum.de:  
<http://www.spektrum.de/news/quantenwettlauf-ins-all/1179337> abgerufen
- Spektrum Akademischer Verlag. (01. 02 2017). *Qubit*. Von Spektrum.de:  
<http://www.spektrum.de/lexikon/physik/qubit/11941> abgerufen
- SPIEGEL-Verlag Rudolf Augstein GmbH & Co. KG. (06. 02 2017). *China schickt Quanten-Satelliten ins All*. Von Spiegel Online:  
<http://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/abhoersicher-china-schickt-quanten-satelliten-ins-all-a-1107921.html> abgerufen
- SPIEGEL-Verlag Rudolf Augstein GmbH & Co. KG. (06. 02 2017). *Forscher teleportieren Signale 100 Kilometer weit*. Von Spiegel Online:  
<http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/quantenteleportation-signale-ueber-glasfaser-uebertragen-a-1054194.html> abgerufen
- Sturm, G. (20. 02 2017). *Was sind Quanten?* Von Quanten.de:  
<http://www.quanten.de/wassindquanten.html> abgerufen
- Teider, O. (26. 01 2017). *Ursprünge der Quantentheorie*. Von Uni Ulm: [http://www.uni-ulm.de/fileadmin/website\\_uni\\_ulm/nawi.inst.251/Didactics/quantenchemie/html/UrsprF.html](http://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/nawi.inst.251/Didactics/quantenchemie/html/UrsprF.html) abgerufen
- Welz, O. (25. 01 2017). *Quantentheorie / Quantenphysik einfach erklärt*. Von Quanten-Web:  
<https://www.quanten-web.de/> abgerufen
- Winter, R. (2016). *Informationsübertragung mit elektromagnetischen Wellen*. Potsdam.
- Wolf, P. (13. 02 2017). *Der Doppelspalt*. Von Quantenphysik in der Schule :  
<http://www.quantenphysik-schule.de/doppelspalt.htm> abgerufen
- Wrobel, C. (01. 23 2017). *Optische Übertragung*. Von SecuPedia:  
[http://www.secupedia.info/wiki/Optische\\_%C3%9Cbertragung](http://www.secupedia.info/wiki/Optische_%C3%9Cbertragung) abgerufen

## Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere an Eides Statt, die von mir vorgelegte Arbeit selbständig verfasst zu haben.

Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Arbeiten anderer entnommen sind, habe ich als entnommen kenntlich gemacht.

Sämtliche Quellen und Hilfsmittel, die ich für die Arbeit benutzt habe, sind angegeben.

Die Arbeit hat mit gleichem Inhalt bzw. in wesentlichen Teilen noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

---

(Datum, Ort, Unterschrift)